

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

**АЛМАЗНО-ИСКРОВОЕ ШЛИФОВАНИЕ  
МАТЕРИАЛОВ ВЫСОКОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ**

**АЛМАЗНО-ІСКРОВЕ ШЛІФУВАННЯ  
МАТЕРІАЛІВ ВИСОКОЇ ФУНКЦІОНАЛЬНОСТІ**

Харків – 2016

ББК 34.5

Г93

УДК 621.923

Рецензенти:

*І. Я. Мовшович*, д-р техн. наук, проф., Заслужений діяч науки і техніки України, Лауреат державної премії України, Українська інженерно-педагогічна академія (м. Харків);

*Ю. А. Сизий*, д-р техн. наук, проф., ДП УкрНТЦ «Енергосталь» (м. Харків)

**Г93 Алмазно-іскрове шліфування матеріалів високої функціональності : монографія [Електронний ресурс]. – Х.: Вид-во «Курсор», НТУ «ХП», 2016. – 272 с. – Рос. мовою.**

Представлені теоретичні та експериментальні дослідження і розробки технологічній системі алмазно-іскрового шліфування у єдності робочого процесу і верстату, на якому він здійснюється відносно інструментальних та інших важкооброблюваних високофункціональних струмопровідних матеріалів сучасної практики машино-, приладо-, авіабудівних та інших механообробних виробництв.

Методологічно дослідження спираються на послідовно розроблювану на фундаментальних засадах сучасної технології машинобудування теорію і практику методу алмазно-іскрового шліфування, що вперше запропонований в НТУ «ХП» та має світовий пріоритет України.

Розглянуті результати можуть бути використані в складі технологічних баз даних прогнозування та підготовки виробництв для алмазно-іскрового шліфування круглих і плоских поверхонь важкооброблюваних матеріалів за технологіями передового рівня продуктивності, стабільності, енерговіддачі і якості обробки.

Видання підготоване за тематичним планом супроводження виконання в науковій школі фізики процесів різання НТУ «ХП» у 2015-2016 рр. прикладного наукового дослідження «Розробка техніко-технологічних рішень і дослідних зразків елементів системи «верстат-оснастка-інструмент» плоского торцевого шліфування важкооброблюваних матеріалів» (номер державної реєстрації 0115U000524).

Для фахівців в області машинобудування, науково-технічних працівників і студентів.

**ББК 34.5**

© Ю. Г. Гуцаленко, 2016

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Предъявление этой работы научному сообществу связано с обязательством автора в рамках ответственного исполнительства проекта НИР «Разработка технико-технологических решений и опытных образцов элементов системы «станок-оснастка-инструмент» плоского торцевого шлифования труднообрабатываемых материалов» (номер государственной регистрации 0115U000524), осуществленного за счет средств государственного бюджета в 2015-2016 гг. в научной школе физики процессов резания НТУ «ХПИ» на кафедре интегрированных технологий машиностроения, носящей имя организатора этой научной школы Михаила Федоровича Семко, аспирантом которого автор имел честь быть.

В значительной части представленная работа опирается на авторские или при его участии исследования предыдущих периодов, получившие обобщения в недавней (2013-2014 гг.) реализации проекта НИР «Разработка технических решений специальной модернизации универсальных станков и технологических баз данных для алмазно-искрового шлифования труднообрабатываемых материалов» (номер государственной регистрации 0113U000425), осуществленного в научной школе физики процессов резания НТУ «ХПИ» по мотивам инициированной в ней в 70-ые годы под руководством М.Ф.Семко и Н.К.Беззубенко и ставшей ее самым промышленно масштабным успехом разработки метода и средств обеспечения с непревзойденными донныне технологическими возможностями в шлифовании труднообрабатываемых электропроводных материалов. Используются также и некоторые авторские материалы, нашедшие отражение в коллективных монографиях «Качество обработки деталей машин» (2003 г.) и «Проектирование технологических процессов в машиностроении» (2005 г.), составивших вторую и пятую книги 10-томного издания «Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения» под редакцией А.В.Якимова и Ф.В.Новикова, с последним из которых автора с аспирантских лет связывает выдержанное испытаниями времени плодотворное профессиональное товарищество, непоколебимой твердости, профессиональному провидчеству и постоянству искренности которого во многом обязана эта монография.

Монография большей частью опирается на многочисленные самостоятельные исследования автора, выполненные в разные годы. И, разумеется, впитала опыт, в том числе совместный с автором экспериментальный, целой когорты соратников по научной школе физики процессов резания Харьковского политехнического института, исследователей и проводников в широкую промышленную практику метода алмазно-искрового шлифования.

Подготовка этой работы к изданию высвечена в благодарной памяти автора бесценным опытом совместных физических исследований и режимных испытаний

совместно с Леонидом Евгеньевичем Кобзарем и Натальей Николаевной Серовой, обсуждений и профессиональных дискуссий с ними и Николаем Кирилловичем Беззубенко, идеологическим руководителем разработки. Память хранит и подключает к использованию профессионально ценные советы и рекомендации Виктора Дмитриевича Мочалова, Юрия Моисеевича Троянова, Петра Климовича Скоробогатько, Николая Петровича Иванова, Петра Григорьевича Матюхи, Леонида Кирилловича Слеты, Николая Афанасьевича Митронова, Ивана Степановича Сальтевского, Беллы Михайловны Свердловой, беседы с хронологически первым в ней после Михаила Федоровича Семко титульным профессором алмазно-искрового шлифования Матвеем Даниловичем Узуняном, его аспирантами Юрием Степановичем Краснощекком, Виталием Викторовичем Малыхиным, Романом Михайловичем Стрельчуком, совместную с мотиватором диссертационного исследования последнего, необыкновенно интересную профессионально и особо ценную автору атмосферой обыкновенной человеческой дружбы, работу с Эдвином Спартаковичем Геворкяном, прежде доверительно открывшим и доньше неизменно искренно, на всю постигнутую им глубину, открывающим мне увлекательный своей природой, технологическими возможностями и перспективами, электроразрядным средством с алмазно-искровым шлифованием мир метода прямой электроконсолидации порошковых материалов искрово-плазменным спеканием.

Представление этой работы неотделимо от благодарности автора за совместный, братский с Олегом Григорьевичем Гуцаленко опыт и обсуждение с ним и Эдуардом Вячеславовичем Рыжовым параллельных исследований 80-х годов алмазно-искрового шлифования износо- и теплостойких наплавочных материалов в киевском академическом Институте сверхтвердых материалов.

Методическим истоком в научной школе физики процессов резания НТУ «ХПИ» работа восходит к монографии «Расширение технологических возможностей алмазного шлифования» (1985 г.) нынешнего руководителя школы, ее базовой кафедры и вышеназванных НИР Анатолия Ивановича Грабченко. Эту работу и представленную здесь объединяет единый подход к математической вероятностной модели процесса шлифования с устойчивой развитостью изнашиваемого в рабочем контакте с обрабатываемым материалом и возобновляемого с принудительным понижением уровня связки режущего рельефа алмазно-абразивного инструмента.

По авторскому замыслу выделение высокой функциональности как обобщенной характеристики обрабатываемых материалов подчеркивает обращение к алмазно-искровому шлифованию в задачах производительной поверхностной инженерии деталей, чья обработка затруднена повышенной твердостью, износостойкостью и другими эксплуатационно привлекательными свойствами, а потому широко востребованными.

Преподнесенный монографии заголовок охватывает лишь часть соответствующих ему исследований автора, в основном в контексте используемой в ее подготовке рукописи автора, предполагаемой им диссертационной по специальности 05.02.08 – технология машиностроения и под рабочим названием «Математическое моделирование и анализ технологических возможностей операций высокопроизводительного алмазного шлифования изделий из высокопрочных пластичных материалов» (2005 г.), получившей одобрительные отзывы титульных рецензентов монографии, которым автор признателен за независимость личного положительного отклика от результатов других прочтений и видений отложенными соискательскими перспективами автора, со светлой памятью о глубоко человеческой личности, совместной работе и просто общении с безвременно ушедшим в мир иной в самом завершении издательской реквизиции этой работы Исааком Яковлевичем Мовшовичем.

Таким образом, осуществляемое первое ознакомление с этой работой научного сообщества имеет перспективу повторного, дополненного выпуска в свет. С позиций представления текущих и ближайших ожидаемых результатов научных исследований – индифферентными обрабатываемым электропроводным материалам усовершенствованными модернизационными подходами и новыми техническими решениями адаптации станкоинструментальных систем к реализации алмазно-искрового шлифования. А также, например, авторскими материалами по обрабатываемости твердых сплавов, исследованиями влияния скорости шлифования на выходные показатели их процессирования и физическим обоснованием перспективы развития алмазно-искрового шлифования в этом направлении, CALS-интеграции в едином технологическом маршруте искрово-плазменного порошкового спекания наноструктурной заготовки и согласованной с ним для достижения наиболее функционально эффективного результата ее окончательной поверхностной инженерии алмазно-искровым шлифованием, моделированию теплофизического поведения алмазно-металлических композиций рабочей части инструментов алмазно-искрового шлифования с изменением температурного режима обработки, другими актуальными разработками.

Свободный формат предисловия к единоличной монографии предоставляет редкую возможность публично поклониться и своим учителям-коллегам в науке, как это отчасти уже сделано выше, и родным и близким, сносящим следующие из неограниченного табельным временем служения ей недостаточности внимания автора.

Учителя и коллеги, соратники по совместной исследовательской работе, заслуживают много большего авторского внимания, и пусть это будет дополнительным стимулом появления второго издания этого труда, в предисловии к которому автор будет иметь возможность попытаться еще восполнить должное им...

Во все мои трудовые времена самыми преданными моими болельщиками – самыми беспокоящимися, сопереживающими, недоумевающими, радующимися – были и остаются мои познакомившиеся 22 октября 1948 года на улице Пушкинской послевоенного Львова родители, тогда будущий бухгалтер-товаровед, осиротевшая в голодные 30-ые златокудрая красавица Мария, и коренастый, подтянутый с 17-ти лет сержантской службой в ВДВ и навсегда ставшим обращенным к себе вызовом «Если не я, то кто же!», тогда курсант военного училища с ускоренным выпуском фронтовиков, жгучий брюнет Григорий из украинской семьи станционной телеграфистки и заводского служащего, в самом начале 43-го экстерном и золотой медалью окончивший в семипалатинской эвакуации среднюю школу и, будучи ее комсоргом, по добровольческому досрочно-возрастному призыву шагнувший сначала в Алма-Атинское военно-пехотное стрелково-пулеметное училище, оттуда, не дождавись выпуска с отличием и лейтенантских погон, опять же по добровольческому отбору – в ВДВ, к своим 25-ти прыжкам с парашютом в войну на родной земле, а потом с боями пешим переходом от Вены к Будапешту и Праге, послевоенной службе в Венгрии, Белоруссии, Германии, Украине, снова Германии и на Дальнем Востоке, где в конце 60-х получил полковничьи погоны и папаху за руководство приграничной группировкой подразделений специального назначения, только что созданной на направлении главного контрудара возможного развертывания масштабного театра военных действий провокационно-агрессивным тогда Китаем, вскоре инициировавшим известный вооруженный конфликт на близлежащем острове Даманский. Оба, Мария Дмитриевна и Григорий Арсентьевич, великий мне пример честного служения родине и преданности семье, в свои сегодняшние 180 лет на двоих каждодневно рука об руку являют терпеливые в преодолении накопленных недугов елико возможные труженичество, житейскую находчивость и самостоятельность, и уже тем, а еще и неколебимыми верой, надеждой, любовью поддерживают меня во всем, даруют оказии всепоглощающих несколькими днями подряд погружений в аналитическую профессиональную деятельность – увы, нечастые по другим причинам, в том числе суетно-производственным.

Но более всего признателен за каждодневные понимание и поддержку своей семье, моим любимым и любящим жене Наталье Георгиевне, квалифицированному конструктору и технологу-машиностроителю, хранительнице домашнего очага, главной моей помощнице и берегине, и детям, англо- и китаеведу-филологу Татьяне и экономисту Ольге, подарившим мне золотые школьные медали и выросшим в моих самых близких и надежных друзей-помощников, профессионально состоявшихся и повзрослевших вместе с моей работой в ХПИ и нашей крепнущей дружбой.

*Summa cum pietate. С величайшим уважением.*

*Ю. Гуцаленко*

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....	9
ВВЕДЕНИЕ .....	10
Глава 1. ОБЗОР ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ, ЗАДАЧИ И ОБЩАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	16
1.1. Прогрессивные технологии алмазного шлифования и пути их совершенствования .....	16
1.2. Обзор становления и развития метода АИШ в исторической ретроспективе .....	26
1.3. Анализ существующих теоретических подходов к прикладному математическому моделированию и оптимизации параметров операций шлифования .....	43
1.4. Основные прикладные задачи и рабочие гипотезы.....	52
1.5. Общая инфраструктура технического обеспечения .....	54
Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОГО ВО ВРЕМЕНИ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ .....	57
2.1 Параметризация рельефа рабочей поверхности шлифовального круга.....	57
2.2. Взаимосвязь износа и обновления режущего рельефа алмазного круга в устойчивом процессе шлифования .....	70
2.3. Взаимосвязь параметров режущего рельефа алмазного круга с шероховатостью и производительностью обработки при устойчивом шлифовании .....	85
Глава 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ .....	91

3.1. Оценка влияния кинематического и физического факторов на условия формирования показателей обработки при алмазном шлифовании .....	91
3.2. Установление и следствия взаимосвязи величины линейного износа зерна с радиусом округления его вершины и максимальной толщиной среза .....	99
3.3. Анализ путей уменьшения силовой напряженности процесса резания на операциях алмазного шлифования .....	102
3.4. Условия повышения производительности и снижения энергоемкости обработки на операциях алмазного шлифования .....	108
3.5. Анализ влияния объема межзеренного пространства алмазного круга на повышение эффективности шлифования .....	114
3.6. Определение и анализ максимально возможной производительности обработки при алмазном шлифовании.....	122
<b>Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОПЫТ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ИЗНОСА И ОБНОВЛЕНИЯ РЕЖУЩЕГО РЕЛЬЕФА АЛМАЗНОГО КРУГА НА ПАРАМЕТРЫ ОПЕРАЦИЙ АИШ И ЕГО ОБОБЩЕНИЕ .....</b>	<b>130</b>
4.1. Исследование параметров операции круглого наружного АИШ.....	132
4.1.1. Круглое наружное АИШ закаленной стали .....	132
4.1.2. Круглое наружное АИШ теплостойкой наплавки .....	136
4.2. Исследование параметров операции плоского АИШ штамповой стали.....	139
4.3. Исследование параметров операции внутреннего АИШ.....	146
4.4. Удельный расход алмаза при АИШ .....	155
4.5. Экономика и технологическая себестоимость АИШ .....	177
4.6. Условия и обеспечение устойчивого и рационального АИШ.....	297
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>204</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>214</b>



## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- АИШ – алмазно-искровое шлифование  
АСПК – алмаз синтетический поликристаллический  
АТП – алмазно-твердосплавная пластина  
ГПС – гибкая производственная система  
КНБ – кубический нитрид бора  
ЧПУ – числовое программное управление  
SPS – искровое плазменное спекание (spark plasma sintering – англ.)

## ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие машиностроительного комплекса требует широкого применения высоких технологий, автоматизированного оборудования и компьютерной техники для создания конкурентноспособной продукции на основе снижения ее себестоимости и улучшения качества, повышения производительности труда. Важное значение в решении этих задач имеет создание эффективных технологий абразивной обработки. За последние годы в данном направлении достигнуты большие успехи, особенно в создании высокопроизводительных процессов алмазного шлифования, что открывает новые технологические возможности эффективной обработки изделий из труднообрабатываемых материалов, особенно повышенной твердости.

Шлифование является основным методом обеспечения высокой точности изготовления деталей машин. Удельный вес шлифовальных станков в общем объеме металлорежущего оборудования постоянно возрастает и достигает, например, на автозаводах западных стран 80%. Среди шлифовальных станков примерно половину составляют круглошлифовальные станки [1].

В машиностроительном комплексе Украины, являющемся сердцевиной ее индустриального комплекса, сосредоточено почти 15 % стоимости основных фондов и свыше 21 % работающих по найму (без малых предприятий – св. 585 тыс. в 2012 г. [2]).

Представленная работа соответствует идеологии государственных программ активизации развития экономики [2] и Концепции Общегосударственной целевой экономической программы развития промышленности на период до 2020 года [3]. Документом [3] среди основных путей и способов развития обозначены: инновационно-технологическая модернизация производства, уменьшение уровня энергоемкости производства, переход к технологическим решениям без использования экологически небезопасных химических веществ и их соединений. Технологическое

переворужение с использованием технической идеологии АИШ полностью соответствует перечисленному.

Разработка метода АИШ с момента его основания выполняется в НТУ «ХПИ» и является национальным приоритетом Украины. Этот метод является практически безальтернативной технологической идеологией эффективной алмазно-абразивной обработки труднообрабатываемых токопроводящих материалов. Появление новых материалов повышенной функциональности, например, инструментального наноструктурного монокристалла вольфрама с повышенной твердостью по сравнению с традиционными твердыми сплавами, только подтверждает это, как показывает собственный исследовательский опыт НТУ «ХПИ». Однако в трудный для науки и промышленности Украины конверсионный, а теперь еще и мировой кризисный период научные исследования в этом направлении и освоение метода промышленностью, за редкими исключениями, почти прекратились. К тому же все предприятия-производители первых партий специальных станков, кроме Мукачевского станкозавода, оказались за пределами Украины. Поэтому прогрессивный метод АИШ вошел сейчас в постоянную практику только немногих отечественных предприятий. Именно преодоление этой ограниченности через формирование и донесение до потенциальных потребителей в реальном секторе экономики технологических основ и инвестиционной привлекательности АИШ в контексте вызовов современности, совместно с аналитическим обобщением собственных разрозненных баз данных и разработкой предложений по модернизации существующих станкоинструментальных систем для его реализации, предусматривают современные исследовательские проекты, выполняемые в научной школе физики процессов резания НТУ «ХПИ» на кафедре интегрированных технологий машиностроения, носящей имя организатора этой научной школы Михаила Федоровича Семко [4-8].

Кроме НТУ «ХПИ» и его основного российского партнера – Экспериментального научно-исследовательского института металлорежущих

станков и других проектных и производственных предприятий и организаций станкоинструментальной промышленности в пределах СССР, а затем СНГ, предшествующее развитие теории и практики метода АИШ осуществлялось усилиями воспитанников и партнеров харьковской научной школы физики процессов резания в университетских и научно-производственных центрах Германии (Магдебург), Венгрии (Мишкольц), Индии (Нью-Дели), Вьетнама (Ханой), Армении (Ереван), России (Белгород, Курск, Пенза), Украины (Киев, Днепрпетровск, Донецк, Мариуполь, Севастополь, Сумы). В новейшей истории независимой Украины первой инициативой со стороны исследователей кафедры-родоначальника метода с запросом государственного бюджетирования явился проект 2013-2014 гг. [4]. По этому проекту впервые выполнена практически многоотраслевая разработка по расширению технологических возможностей уже используемых промышленностью плоско- и круглошлифовальных станков, являющихся наиболее распространенными в обеспечении алмазно-абразивных операций подразделениями механической обработки в основных производствах машино-, приборо- и авиастроения, с предложением использования соответствующей электронной конструкторской документации по модернизации оборудования для АИШ, разработанной впервые.

Решение 3-ей Международной научно-практической конференции «Эффективность организационно-экономического механизма инновационного развития высшего образования Украины» (3-4 октября 2013 г., Киевский национальный университет технологий и дизайна) открывает вывод ([9], на языке оригинала): «Суспільний прогрес у глобальному та європейському вимірах має явні ознаки дослідницько-інноваційного типу. Особливо така тенденція характерна для груп успішних країн».

Ускорение отдачи прогрессивных инноваций является ведущей тенденцией в определении приоритетов государственного финансирования научных исследований. Принятый в практике планирования развития

отечественной науки обычно двухлетний срок выполнения прикладных исследований в высших учебных заведениях и научных учреждениях укладывается сегодня в норму среднесрочного планирования инноваций [10]. Предсказуемость эффективности реализации инноваций на ранних стадиях их жизненного цикла является решающим аргументом конкуренции на современном технологическом рынке, актуализируются научно-технические разработки соответствующих адекватных аналитико-прогностических научных подходов и методик инженерного уровня.

Прогнозирование и инвестиционную политику оптимального развития промышленности и составляющего ее основание машиностроения в современном мире принято соотносить со сменой и развитием экономических укладов, определяемых совокупностью технологий, отличающих экономику промышленно развитых стран [11]. Ведущие мировые экономики сегодня переживают пятый технологический уклад, среди основных определителей которого вычислительная техника, программное обеспечение, массовое распространение информационных технологий [12].

Развитие современного машиностроения актуализирует прикладные разработки, обеспеченные комплексными теоретическими и экспериментальными исследованиями, позволяющими максимально эффективно применять эти разработки в реальном секторе экономики, с высокой готовностью к интегрированию в CAE/CAD/CAM/CAQ связанные компьютеризированные интегрированные производства (СІМ) на основе повышения культуры и функциональной результативности моделирования, проектирования и производства объектов и процессов обработки [13, 14], что особенно важно для финишного формообразования. По этому пути развиваются тренды станкоинструментальных технологий и метод АИШ.

Необходимость аналитически обоснованных прикладных инноваций определяется сложностью и масштабностью стоящих перед отечественным машиностроением современных задач, возрастанием конкурентоспособной

ответственности в условиях усиливающихся глобалистических тенденций в экономике вообще и в ее машиностроительном базисе в особенности [15-18], особенно ввиду стратегической мотивации выстраивания и обеспечения приоритетов на несколько десятилетий вперед, которым предвосхищается шестой технологический уклад, уже начавший формироваться в недрах пятого [19, 20], и от которого ожидается прежде всего дальнейшая интеллектуализация всех сфер экономики, опирающаяся на выявление, целенаправленное реформирование и использованием открываемых новых уровней ее потенциала.

Помимо глобальных тенденций развития экономических укладов, насущность перевооружения машиностроительного сегмента экономики Украины передовыми технологиями, к сожалению, определяется также волатильностью развития объемов производства в денежном выражении, невысоким индексом машиностроительной продукции в линейке основных отраслей, как это подробно рассмотрено [04].

На остроту проблемы технико-технологической конкурентоспособности Украины в мировом сообществе указывают также рейтинговые данные Всемирного экономического форума (WEF), в соответствии с которыми охватывающий 148 стран индекс глобальной конкурентоспособности (GCI) например 2013-2014 гг. [21] определяет ей только 84-е место. По таким составляющим, как технологический уровень» и «инновационный потенциал» имеем немногим лучшие 81-е [22] и 79-е [23] места соответственно. По индексу WEF-GCI [21] из европейских стран в оценках рассматриваемого здесь периода позади только Босния и Герцеговина (87-е место, но тренд + 1 против «минус 11 мест» для Украины по сравнению с 2012-2013 гг.), Молдова (89-е место с нисходящим трендом, но только – 1), Греция (91-е, + 5), Албания (95-е, – 6), Сербия (101-е, – 6). При этом, в расчетах с использованием данных Всемирного банка [24] и Бюро переписи населения США [25], объем валового внутреннего продукта (ВВП) Украины по сравнению, например, с известной

своими макроэкономическими проблемами Грецией в расчете на душу населения в Украине почти вшестеро меньший, чем в Греции.

Применение результатов опытно-экспериментальной практики АИШ в шлифовальном технико-технологическом сегменте механообрабатывающих отраслей промышленности ориентировано на прямое содействие поднятию их конкурентоспособности, преимущественно инструментальной, машино-, приборо- и авиастроения, за счет расширения технологических возможностей универсальных шлифовальных станков и повышения на этой основе производительности, стабильности, энергоотдачи и качества рабочих процессов шлифования изделий, прежде всего из труднообрабатываемых материалов повышенной функциональности.

Обострение кризисных явлений в условиях глобальной конкуренции товаров особенно стимулирует как заинтересованность производителей в энергоэффективных производственных технологиях высококачественной обработки с одновременной правкой инструмента в применениях современных алмазных шлифовальных кругов на металлических связках, так и пользователей к повышению их функционально-эксплуатационных показателей. Метод АИШ экономически заинтересовывает и производителей, и пользователей продукции.

Современные разработки проблематики АИШ отвечают парадигме ГПС и предполагают развитие станочных комплексов алмазно-абразивной обработки с ЧПУ.

Основанием для подготовки монографии к выпуску в свет является выполнение в НТУ «ХПИ» в 2015-2016 гг. по приказу Министерства образования и науки от 09.02.2015 г. № 105 научно-исследовательской работы «Разработка технико-технологических решений и опытных образцов элементов системы «станок-оснастка-инструмент» плоского торцевого шлифования труднообрабатываемых материалов» (номер государственной регистрации 0115U000524), проектом которой она предусмотрена.

## ГЛАВА 1. ОБЗОР ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ, ЗАДАЧИ И ОБЩАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

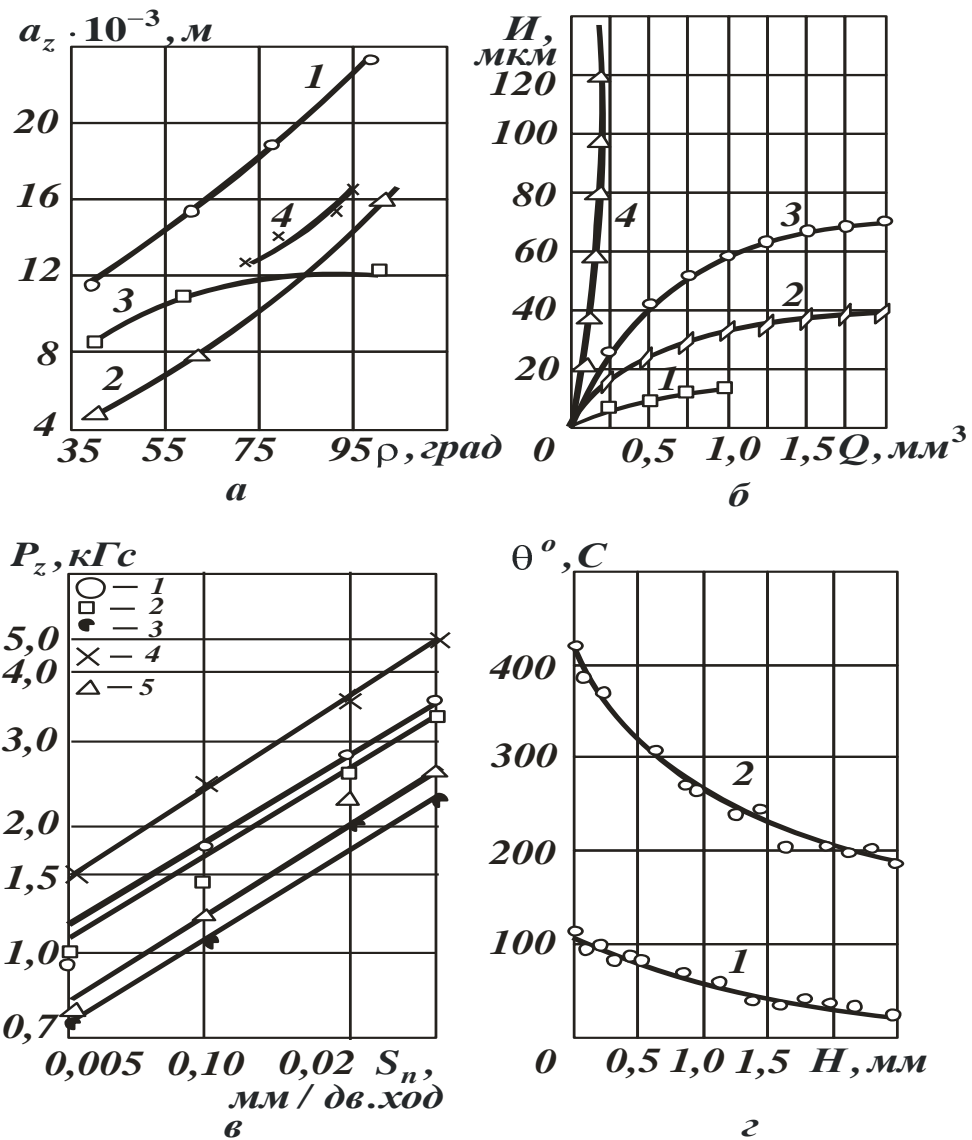
### 1.1. Прогрессивные технологии алмазного шлифования и пути их совершенствования

Для шлифования материалов с повышенными физико-механическими свойствами широко применяются алмазные круги [26-48]. В силу высокой остроты режущих кромок они позволяют уменьшить силы и температуру резания, повысить качество обрабатываемых поверхностей [49], рис. 1.1. Алмазные круги стали незаменимы при прецизионной обработке твердосплавных и быстрорежущих инструментов [30-32, 39, 43, 44, 48, 50-58]. Благодаря их применению удалось решить ряд принципиальных вопросов, связанных с высококачественной обработкой и существенным повышением ресурса работы инструментов.

Однако, на практике получили применение в основном алмазные круги на относительно мягких органических и керамических связках. Эффективной областью их использования являются операции окончательного шлифования, характеризующиеся съемом небольших припусков. Применение алмазных кругов на указанных связках на операциях предварительного шлифования (т.е. при съеме относительно больших припусков) взамен обычных абразивных кругов, как показывает практика, не эффективно, что связано с высоким износом алмазных кругов.

Применение алмазных кругов на прочных металлических связках позволяет уменьшить их износ. Однако при этом снижается их стойкость вследствие затупления алмазных зерен и засаливания рабочей поверхности круга продуктами обработки. Это требует частых механических правок круга, которые приводят, во-первых, к удалению достаточно большого объема алмазноносного слоя (что нежелательно), во-вторых, к незначительному выступанию алмазных зерен над уровнем связки.





*a* – зависимость предельных толщин среза от угла заострения для следующих пар абразивного и обрабатываемого материалов: 1 – минералокерамика ЦМ 322 – сталь 40; 2 – минералокерамика ЦМ 322 – ХН77Т10Р; 3 – электрокорунд – сталь 40; 4 – алмаз – ХН77Т10Р;

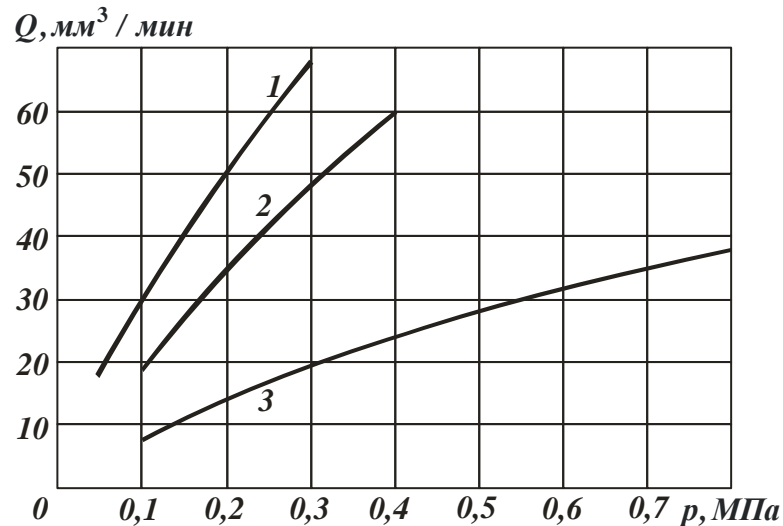
*б* – размерный износ кругов из различных материалов: 1 – природный алмаз; 2 – синтетический монокристалл; 3 – синтетический алмаз марки АС4; 4 – карбид кремния зеленый;

*в* – влияние марки алмаза на силу резания: 1 – АС2; 2 – АС4; 3 – АС15; 4 – Э9А; 5 – СМ1К;

*г* – изменение температуры резания в зависимости от глубины залегания термодпары: 1 – круг из синтетического алмаза; 2 – круг из карбида кремния зеленого

Рис. 1.1. Основные зависимости процесса шлифования, установленные различными авторами

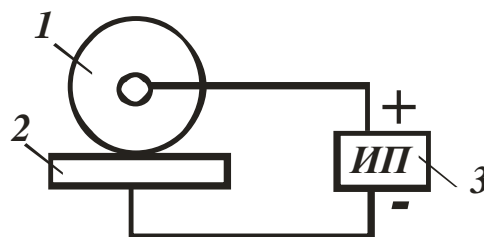
В результате наблюдается повышенный расход алмаза, снижение режущей способности круга, шлифование осуществляется с небольшой производительностью обработки [46], рис. 1.2.



Круги: 1 – АС2 100/80 В2-01 4; 2 – АС2 100/80 К5 4; 3 – АС6 100/80 М2-01 4

Рис. 1.2. Влияние давления  $p$  на производительность обработки  $Q$

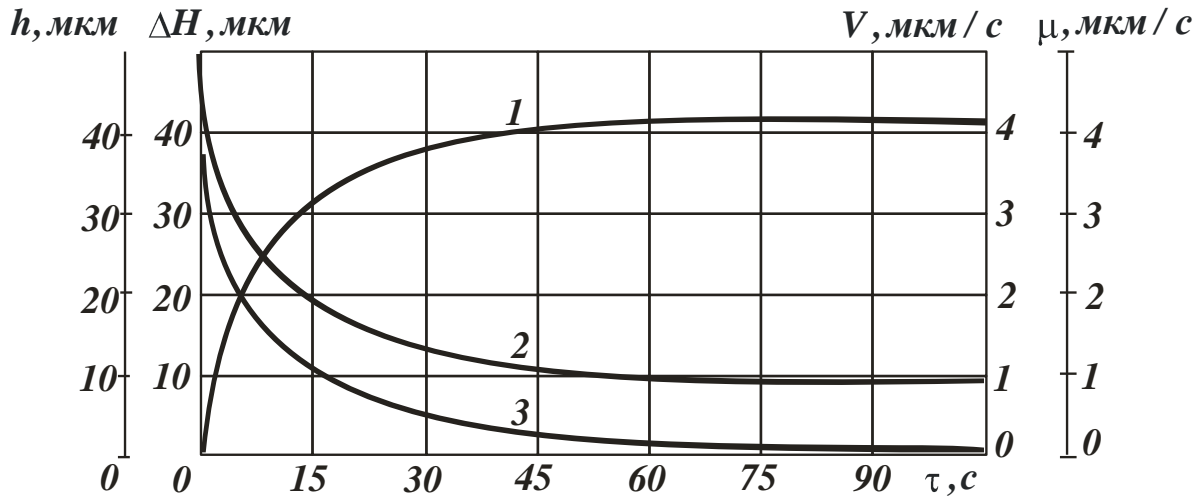
Применение электрофизикохимических методов правки алмазных кругов на металлических связках (методов электрохимической и электроэрозионной правки) более эффективно по сравнению с методами механической правки, которые выполняются с использованием абразивных брусков, абразивных кругов и т.д. [38-40, 43-45, 53, 59-66], рис. 1.3. Данные методы обеспечивают значительное выступание зерен над уровнем связки и повышение производительности шлифования.



1 – круг; 2 – электрод-деталь; 3 – источник питания

Рис. 1.3. Схема подключения источника питания к зоне электроэрозионного воздействия на алмазный круг [65]

Особо следует отметить метод непрерывной автономной электрохимической правки алмазных кругов на металлических связках в процессе шлифования, разработанный в Харьковском политехническом институте [39, 61, 67]. Физическая сущность метода состоит в возможности электролитического растворения металлической связки за счет подачи в межэлектродный зазор (алмазный круг – правящее устройство “катод”) электролита. Данный метод правки достаточно производительный, обеспечивает непрерывное поддержание в процессе шлифования развитого режущего рельефа алмазного круга, т.е. обеспечивает поддержание его высокой режущей способности. Эффект достигается в результате увеличенного выступания режущих зерен над уровнем металлической связки, устранения засаливания рабочей поверхности круга продуктами обработки и т.д. Наглядным подтверждением эффективности применения данного метода правки являются результаты, приведенные на рисунке 1.4 [61].



1 –  $\Delta H = \Delta H(\tau)$ ; 2 –  $h = h(\tau)$ ; 3 –  $V = V(\tau)$  и  $\mu = \mu(\tau)$ ,  $\mu = V$

Условия обработки:  $V_{кр} = 20$  м/с;  $P_n = 3,0$  МПа

Рис. 1.4. Влияние продолжительности обработки  $\tau$  на износ круга  $\Delta H$ , высоту зерен  $h$ , скорость износа круга  $V$  и скорость снижения высоты зерен  $\mu$  в переходной фазе шлифования АСПК

Как следует из рисунка 1.4, при обычном алмазном шлифовании

синтетического сверхтвердого поликристаллического материала с течением времени обработки высота выступания зерен над уровнем связки интенсивно уменьшается, что снижает режущую способность алмазного круга на металлической связке и производительность обработки. При шлифовании с непрерывной электрохимической правкой алмазного круга на металлической связке происходит стабилизация во времени его режущего рельефа. С увеличением плотности тока увеличивается производительность и уменьшается энергоемкость обработки; удельный расход алмаза и удельная себестоимость обработки изменяются по экстремальным зависимостям, принимая минимальные значения [61]. Применение электрохимической правки позволяет повысить эффективность алмазного шлифования, однако в научно-технической литературе нет четкого физического и математического представления о причинах, вызывающих такой характер изменения основных показателей шлифования. Это требует дальнейших исследований, главным образом на основе математического моделирования данного процесса шлифования.

Метод непрерывной автономной электрохимической правки алмазного круга на металлической связке получил применение при шлифовании как металлических, так и неметаллических материалов (синтетических сверхтвердых материалов и т. д.).

Большими технологическими возможностями в плане обеспечения высокой режущей способности алмазного круга на металлической связке располагает процесс АИШ – комбинированный метод шлифования, разработанный в Харьковском политехническом институте под руководством проф. М. Ф. Семко и проф. Н. К. Беззубенко [68-72, 35, 73, 60]. Он основан на введении в зону резания дополнительной энергии в форме электрических разрядов. Для возбуждения электрических разрядов могут использоваться источники импульсного или постоянного тока. Положительный полюс подключается к алмазному кругу, а отрицательный – к обрабатываемой детали. Процесс может осуществляться на любом шлифовальном станке после его

несложной модернизации, заключающейся в электроизоляции шпинделя алмазного круга и детали от массы станка и, соответственно, в подводе электрического тока к кругу и детали.

Производящая система АИШ испытывает совместное биконтактное электромеханическое нагружение с одновременной трансформацией объемов субъектов контактирования в рабочей зоне механическим резанием-шлифованием (основной процесс) и электрической эрозией (вспомогательный процесс).

Субъектами электромеханического контактирования при АИШ выступают шлифовальный круг и заготовка детали. Производящим (обрабатывающим) субъектом механического контакта является шлифовальный круг, производимым (обрабатываемым) – заготовка детали, которая в процессе резания-шлифования освобождается от припуска на обработку в соответствии с заданной чертежом (операционным эскизом) задачей ее окончательного (на заключительной операции) или предварительного (на промежуточной операции) формообразования. При этом одновременно объемно трансформируется и обрабатываемая поверхность, испытывающая в актах резания и трения контактный механический износ выступающих над уровнем связки работающих алмазных абразивных зерен, и эти зерна, а также связка – вследствие истирания стружками, срезаемыми и срезанными, алмазно-абразивным шламом и, в дестабилизированных процессах регенерации режущего рельефа, при утрате им достаточного выступания алмазных зерен над уровнем удерживающей их связки шлифовального круга, – непосредственно обрабатываемой поверхностью.

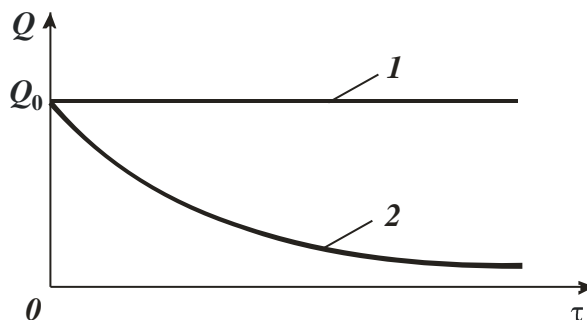
Ролевое распределение субъектов электрического контакта АИШ на производящий (обрабатывающий) и производимый (обрабатываемый) проблематично: эрозионные разрушения в пятнах канала электрического разряда всякий раз затрагивают обе стороны взаимодействия. Главная задача (целевая функция) токоподвода в зону резания через выступающие

электродами шлифовальный круг с токопроводной основой (металлической связкой) и заготовку детали из токопроводного материала (металла) заключается в электроэрозионном разрушении связки круга для обеспечения выступления из нее новых режущих зерен по мере износа, разрушения и выпадения отработавших. Поэтому, поскольку электронно-ионная бомбардировка анода создает больший разрушительный эффект, чем атака катода положительными ионами, роль анода отводится алмазно-металлической композиции рабочей части шлифовального круга.

В связи с эрозионным влиянием на поверхность заготовки метод АИШ стимулировал дальнейшее развитие автономной (вне зоны резания), совмещенной во времени с рабочим процессом шлифования правки, как регулятора поддержания режущего рельефа на необходимом уровне развитости, с достаточной для компенсации его износа интенсивностью понижения связки, обеспечивающей максимальное использование режущих свойств сверхтвердых абразивов (их минимальный удельный износ и максимальный ресурс инструмента) в заданной системе кинематико-геометрических условий обработки и параметров микрогеометрического и микроструктурного качества формируемых поверхности (микрогеометрия) и поверхностного слоя (микроструктура).

Электрические разряды, воздействуя на образующиеся стружки и металлическую связку круга, приводят к их термическому разрушению (частично испарению). В результате исключается налипание продуктов обработки на рабочую поверхность круга (засаливание круга), а за счет термического разрушения металлической связки идет подключение в работу новых режущих зерен круга. Это обеспечивает качественное непрерывное вскрытие алмазноносного слоя круга и поддержание его высокой режущей способности, что приводит к уменьшению сил и температуры резания, повышению производительности и качества обработки. Стойкость алмазного круга увеличивается в десятки и сотни раз. По сути, алмазный круг может

обладать высокой режущей способностью вплоть до его полного износа, рис. 1.5.



1 – АИШ; 2 – алмазное шлифование без токоподвода в зону резания

Рис. 1.5. – Характер зависимости производительности обработки  $Q$  от времени шлифования  $\tau$

Процесс АИШ получил применение на практике при обработке главным образом твердосплавных изделий. Промышленностью освоен выпуск гаммы специальных станков, реализующих АИШ. Например, на Мукачевском станкостроительном заводе было организовано серийное производство станка модели ЗВ624 для заточки напайных твердосплавных резцов по задней грани и станка модели 3629Р для заточки резцов по радиусу. На Витебском заводе заточных станков организовано производство станка модели ЗЕ667РФ1 для заточки фрезерных головок, на Саратовском станкостроительном заводе – станка модели ЗК227ВР для внутреннего шлифования, на Ленинанском шлифовальном заводе – станка модели ЗК12Р для наружного круглого шлифования и т. д. [74, 75]. Станки укомплектованы электроэрозийными генераторами типа ШГИ, а также встроенными в электрическую схему станка низкочастотными генераторами типа ИТТ. Процесс АИШ может быть реализован и при использовании обычных выпрямителей, что имеет место на практике.

Многолетний опыт применения АИШ указывает на значительные трудности в его реализации. В одних случаях оказывается недостаточно подводимой электрической энергии для своевременного термического

разрушения металлической связки и продуктов обработки. В результате алмазный круг засаливается и быстро затупляется, что снижает его режущую способность и не позволяет реализовать потенциальные возможности АИШ. В других случаях, за счет интенсивного электрического воздействия на алмазный круг наблюдается его повышенный износ, а за счет воздействия электрических разрядов на обрабатываемую деталь – ухудшение качества обработки. Очевидно, необходимо знать оптимальное количество подводимой электрической энергии, обеспечивающей своевременное термическое разрушение металлической связки и продуктов обработки и непрерывное поддержание в процессе высокой режущей способности круга. Это требует разработки подхода к оптимизации параметров АИШ. Сложность решения задачи состоит в том, что процесс обусловлен проявлением как механического, так и электроэрозионного (теплого) факторов. Этим можно объяснить отсутствие теоретического подхода к расчету оптимальных условий АИШ.

Для решения оптимизационных задач используются методы однофакторного и многофакторного планирования эксперимента [31, 65, 66, 76, 77]. Например, исходя из обеспечения экстремума (или граничного значения) одного из выходных технологических параметров шлифования на основе экспериментальных данных выбираются рациональные механические и электрические параметры шлифования. Однако, это позволяет получить частные решения для вполне конкретных условий обработки и не раскрывает потенциальных возможностей процесса. Более общее решение можно получить лишь на основе построения математических моделей процесса АИШ, увязывая аналитически входные параметры с выходными посредством физических параметров, таких как параметры режущего рельефа круга, износа зерен и другие, наиболее ответственные за протекание процесса шлифования.

При решении оптимизационных задач важно рассматривать два условия (необходимое и достаточное) осуществления процесса АИШ.

Необходимое условие осуществления АИШ – это стабилизация во



времени параметров режущего рельефа алмазного круга за счет введения в зону резания дополнительной электрической энергии.

Достаточное условие осуществления АИШ – это стабилизация во времени параметров оптимального режущего рельефа круга исходя из критериев максимальной производительности обработки, экономически обоснованного удельного расхода алмаза, минимальной себестоимости обработки, требуемой шероховатости обработки и т. д.

Для выполнения необходимого условия надо знать функциональные связи параметров режущего рельефа круга со скоростью износа зерен, чтобы подбором интенсивности электроэрозионного воздействия на круг обеспечить устойчивый во времени процесс шлифования.

Для выполнения достаточного условия надо знать параметры оптимального режущего рельефа круга и, соответственно, скорость износа зерен для такого рельефа и интенсивность электроэрозионного воздействия, чтобы обеспечить устойчивый во времени процесс шлифования.

Очевидно, для каждого режущего рельефа круга существует вполне конкретная скорость износа зерен. Поэтому экспериментальным путем несложно подобрать интенсивность электроэрозионного воздействия на круг, обеспечивающую выполнение необходимого условия.

Выполнить достаточное условие значительно сложнее, так как надо знать модель оптимального режущего рельефа и параметры, которые его определяют. Экспериментальным путем решить данную задачу сложно, необходим теоретический подход к оптимизации параметров АИШ.

Для того чтобы провести оптимизацию процесса алмазного шлифования, необходимо располагать аналитическими зависимостями для определения основных технологических параметров шлифования, которые могут быть использованы в качестве критериев оптимизации процесса. Такие зависимости должны содержать режимы шлифования, характеристики круга и обрабатываемой детали, включая параметры режущего рельефа круга: высоту

выступания зерен над уровнем связки, поверхностную концентрацию зерен, величину линейного износа зерен и т. д.

Целый ряд работ, выполненных в научной школе физики процессов резания НТУ «ХПИ» [78-96], посвящен путям совершенствования и инструментальной поддержке алмазного шлифования применительно к расширенному кругу прогрессивных технологических методов, как с подводом в зону обработки электрического тока (АИШ и др.), так и без него, в ходе специально посвященного проблематике АИШ прикладного научно-исследовательского недавнего исследования [4].

## 1.2. Обзор становления и развития метода АИШ в исторической ретроспективе

Научно-техническое соперничество СССР и США, в особенности бурное развитие обеими сверхдержавами во второй половине XX века ракетно-космического материаловедения, стимулировало появление в мировой практике новых высокопрочных и высокотвёрдых, термо- и износостойких труднообрабатываемых материалов. Обострение комплекса проблем производительности, качества и стабильности механической обработки побудило к разработке новых технологических подходов, объединению известных технических решений в поиске принципиально новых результатов функционирования станков и инструментов.

Проф. М. Ф. Семко, ученика проф. Н. И. Резникова в предвоенной истории и заведующего кафедрой резания металлов и металлорежущих инструментов, ректора Харьковского политехнического института в его более чем тридцатилетнее послевоенное время, всегда отличала способность верной оценки перспектив развития науки и практики резания материалов, основанная на глубочайшем профессиональном интеллекте. После создания в СССР первых синтетических алмазов и организации их промышленного производства

– с начала 60-х годов – он концентрирует усилия руководимого им коллектива на разработке физических основ резания инструментами из сверхтвердых материалов, посвящает этой проблематике вводную статью в первом выпуске организованного им республиканского межведомственного научно-технического сборника «Станки и режущие инструменты» [97], ныне известного как «Резание и инструмент в технологических системах», последовательно определяет направления исследований и создает научную школу. При самом непосредственном организующем и деятельном участии Н. К. Беззубенко, ученика М. Ф. Семко, одним из заметных результатов этой работы и стала приоритетная разработка метода АИШ– принципиально нового метода абразивной обработки инструментами из сверхтвердых материалов [68, 98, 59, 99, 69, 100-102].

Сущность метода заключается в том, что в зону резания целенаправленно вводится энергия в форме электрических импульсов определенной мощности, формы, продолжительности и частоты, в том числе с дополнительным наложением ультразвуковых колебаний. Работа проводится в среде простых, безвредных и экологически чистых смазывающе-охлаждающих жидкостей.

На первом этапе разработки, в 70-е годы, были заложены начала научных и технологических основ этого метода. Непререкаемый научный авторитет М. Ф. Семко, энтузиазм и профессиональная компетентность Н. К. Беззубенко, их талант образовывать вокруг себя и своего дела круг увлеченных единомышленников, позволили объединить в этой разработке усилия специалистов нескольких кафедр и лабораторий Харьковского политехнического института, добиться в 1976-1979 гг. принятия решений ГКНТ СССР по развитию разработки в государственном масштабе. Именно такого масштаба были личности М. Ф. Семко и Н. К. Беззубенко, учёных и просветителей. Несомненной их заслугой в научно-практическом продвижении передовой разработки, немислимом в государственном масштабе как без ведущей роли М. Ф. Семко, так и без поддержки ведомым им Н. К. Беззубенко,

является и то, что им удалось привлечь к ней деятельное внимание головной профильной организации СССР – Экспериментального НИИ металлорежущих станков (ЭНИМС, г. Москва), уже в 1973 году, действуя в рамках заключенного с ХПИ договора о содружестве, проведшего собственные исследования процесса, и уже по их первым результатам активно и последовательно включившегося в разработку, постепенно из статуса партнера ХПИ в ней перейдя в статус координатора государственной научно-технической программы создания техники и технологий АИШ.

Благодаря государственной поддержке, способствующей расширению круга и географии энтузиастов АИШ, электроэрозионная абразивная обработка по этому методу на практике успешно конкурирует и с обычным шлифованием, и с также объединяющим в рабочей зоне в электрическую цепь обрабатываемое изделие и обрабатывающий инструмент электрохимическим шлифованием, уверенно оформляется в самостоятельное технико-технологическое направление научно-прикладных разработок в области абразивной обработки с определяющей организационно-методической ролью ХПИ и ЭНИМСа.

Завершением первого этапа разработки можно считать проверку в производстве технологического процесса алмазно-искрового шлифования твердосплавных изделий [103], завершение в 1980 году предусмотренного постановлением ГКНТ СССР № 390 от 16.07.76 формирования совместно с НПО ЭНИМС (НИИ и завод "Станкоконструкция"), отраслевыми станкостроительными заводами и специальными конструкторскими бюро технических заданий на создание и освоение производства заточного, кругло- и внутришлифовальных станков для алмазно-эрозионной (алмазно-искровой) обработки.

Увы, заканчивать эти работы, предъявленные Государственной приёмочной комиссии в 1980 году и получившие её высокую оценку [104], Н. К. Беззубенко пришлось уже без М. Ф. Семко – их главного инициатора и вдохновителя.

При АИШ, в сравнении с обычным шлифованием, в два раза и более повышается и стабилизируется во время работы режущая способность абразивного инструмента, что обуславливает повышение производительности, многократно повышается период стойкости круга, вследствие чего значительно снижаются затраты на его правку, на 25-40% снижаются затраты энергии на срез металла, главным образом вследствие снижения потерь на трение связки круга с заготовкой и стружкой, в 1,3-1,5 раза снижается сила резания и средняя температура в зоне шлифования, повышается качество обработки (отсутствие прижогов, микротрещин, других дефектов).

Отсутствие засаливания круга и стабильное обеспечение необходимого выступления режущих зерен над поверхностью связки позволяют, используя этот метод, обрабатывать твёрдые сплавы, безвольфрамовые твёрдые сплавы, нержавеющей, жаропрочные, титановые сплавы, немагнитные и магнитные материалы, износостойкие, труднообрабатываемые наплавки и покрытия, сверхтвёрдые материалы, высокопрочные керамики, силицированный графит, а также цветные металлы и другие материалы, шлифование которых обычными методами затруднено.

В 1982 году разработка была отмечена дипломом и сразу тремя медалями ВДНХ СССР, в том числе золотой.

Следующий этап разработки (80-ые – 90-ые годы) связан с освоением промышленного выпуска специальных станков (табл. 1.1) и источников технологического тока, широким внедрением разработки в практику металлообрабатывающих отраслей. Государственной программой развития станкостроения СССР на 1986-1990 гг. и на период до 2000 г. предусматривалось расширение технологических возможностей шлифовальных станков за счет их дооснащения системами электроэрозионной правки и стабилизации режущей способности кругов. Предусматривалась, в частности, замена станками этого типа большинства ранее выпускавшихся моделей алмазно-электрохимических станков, как не обладающих необходимой

эксплуатационной надежностью [105].

Таблица 1.1. Специальные станки-полуавтоматы для АИШ  
заводов-производителей в СССР (СНГ):

МСЗ – Мукачевский станкостроительный завод (Украина);

ВЗЗС – Витебский завод заточных станков (Беларусь);

ЛЗШС – Ленинанский завод шлифовальных станков (г. Гюмри, Армения);

ВЗШС – Вильнюсский завод шлифовальных станков (Литва);

СЗШС – Саратовский завод шлифовальных станков (Россия);

ОСШ – Оршанский станкостроительный завод (Беларусь)

Тип станка	Завод	Модель	Объект обработки
Заточной	МСЗ	ЗВ624	Резцы (задние поверхности)
		З629Р	Резцы и выглаживатели (радиусные поверхности)
		ЗВ626	Резцы (передние поверхности)
	ВЗЗС	ЗЕ667РФ1	Фрезерные головки
		ЗМ667Ф2	Фрезы торцовые
		ВЗ-184Р	Коронки буровые
Круглошлифовальный	ЛЗШС	ЗК12Р	Наружные поверхности вращения
		ЗУ12ВРФ11	
	ВЗШС	ВТ-82	
Внутришлифовальный	СЗШС	ЗК227ВР	Внутренние поверхности вращения
		ЗМ227ВЭРФ2	
Плоскошлифовальный	ОСШ	ОШ-226	Плоские поверхности

Совершенствование метода и оборудования электроэрозионной алмазно-абразивной обработки на собственной основе, с более полным использованием возможностей комбинирования рабочих процессов путем разработки и освоения технологий и станков двойного скоростного шлифования, позволяет

существенно снизить установленную мощность электродвигателя привода главного движения и суммарную (например, с установленной мощности всех электродвигателей в 15,6 кВт у станка-прототипа мод. 3К227ВР до 10,1 кВт у станка мод. 3М227ВЭРФ2, Саратовский завод шлифовальных станков, Россия). Переход к массовым единичным срезам с увеличенными длинами при одновременном утонении снимаемых стружек с повышением скорости обрабатываемых заготовок от 0,5 м/с до 5 м/с, например, при обработке магнитотвердого материала ЮНДК24Т2 и твердых сплавов ВК8 и ВК15, при неизменности других режимов шлифования этих труднообрабатываемых материалов, позволяет повысить его производительность в 1,14-1,45 раза [106]. Такая практика по сути поддерживала тенденцию развития от конвенциональной универсализации к углубленной методической (на основе АИШ) специализации шлифовальных станков в направлении поддержки поточных, крупносерийных и массовых автоматизированных производств.

Без М.Ф.Семко совместный характер разработки АИШ ЭНИМС и ХПИ постепенно нисходит к самостоятельным изысканиям. Почти через 10 лет после защиты первой диссертации по АИШ, выполненной в ХПИ [69], диссертация в том же тематическом поле завершается и защищается и в ЭНИМС [107]. Под руководством Э. Я. Гродзинского сотрудниками ЭНИМС к этому времени выполняется целый ряд разработок в этом направлении [108-114, 62, 115-121].

В этот же период интерес к подобным разработкам наблюдается и за рубежом СССР. Так, японская фирма Nisco Machine Tool Co разрабатывает к 1986 году серию NSG-52 плоскошлифовальных станков с ЧПУ с использованием системы "Сотмес" для электроразрядной правки кругов, обеспечивая тем самым повышение производительности (в 1,4-2,5 раза) и качества обработки.

90-е годы отмечаются обобщением теоретических обоснований метода, накопленного опыта лабораторных и промышленных исследований [122, 60]. В условиях опытно-экспериментальной базы филиала возглавляемой

Н. К. Беззубенко кафедры «Автоматизация и комплексная механизация машиностроения» на машиностроительном заводе «ФЭД» впервые исследуются технологические возможности АИШ с наложением ультразвуковых колебаний [123]. При комбинированном шлифовании с наложением ультразвуковых колебаний действие электрических разрядов обеспечивает формирование рабочего рельефа инструмента и поддержание его режущих свойств при работе, а ультразвук влияет на состояние межэлектродного зазора, способствует иницированию разрядов и повышению их равномерности, изменяет кинематику режущих элементов (их траекторию, геометрию). Колебания создают кавитацию жидкости, активизируя её поверхностно-"режущие" действия, смазывающие и очищающие свойства, что снижает трение, устраняет наросты и налипания. В результате облегчается процесс микрорезания и улучшаются условия формирования обработанной поверхности.

Современный период развития разработки характеризует обращение к аналитическим подходам описания условий устойчивости процесса шлифования, повышения на этой основе уровня прогнозирования и обеспечения технико-экономических показателей алмазно-искровой обработки в реальных условиях [124, 125], эффективной поддержки конструкторской, технологической и организационной подготовки производства (у производителя станков и инструментов) [126], повышения производительности и качества производства, эксплуатационных характеристик шлифованных деталей (у потребителей алмазно-искровых технологий и их продукции) [66].

Помимо ХПИ и НПО ЭНИМС, других проектных, исследовательских и производственных предприятий и организаций станкоинструментальной промышленности в образовавшихся с распадом СССР государствах, прошедшие годы отмечены исследованием и развитием алмазно-искрового шлифования усилиями воспитанников и партнёров харьковской научной школы физики процессов резания в университетских и научно-



производственных центрах Германии (Магдебург), Венгрии (Мишкольц), Индии (Нью-Дели), Вьетнама (Ханой), Нигерии (Абуджа), Армении (Ереван), России (Белгород, Курск, Пенза), Украины (Киев, Днепрпетровск, Донецк, Мариуполь, Севастополь, Сумы).

Среди перечисленных выше следует выделить донецкую ветвь харьковской научной школы физики процессов резания, представитель которой проф. П. Г. Матюха после окончания заочной аспирантуры в Харьковском политехническом институте и защиты кандидатской [71], а потом и докторской [127] диссертаций в тематическом поле АИШ является активным исследователем, популяризатором и проводником этого метода. Под его руководством в русле исследования этого метода и аналогичной автономной электроэрозионной правки алмазных шлифовальных кругов на металлических связках подготовлены и продолжают подготовку многие специалисты инженерной и научной квалификации. Сегодня ДонНТУ является одним из ведущих научных центров современной теоретической и экспериментальной разработки метода АИШ и автономной электроэрозионной правки алмазных шлифовальных кругов на металлических связках в Украине.

Характерными свидетельствами направленности и содержательности этих разработок является научная монография [128] и, в ближайшей ретроспективе, научные статьи [129, 130], опубликованные в издаваемом ИСМ НАН Украины журнале «Сверхтвердые материалы» в 2013 г. Оба исследования, посвященных шлифованию разных токопроводных объектов обработки, быстрорежущей ванадиевой инструментальной стали Р6М5Ф3 [129] и твердого сплава ВК8 совместно с конструкционной сталью (сталь 45) [130], объединяет одна и та же технологическая система обработки: модернизированный для электроэрозионного воздействия на рабочую поверхность круга в автономной зоне станок 3Г71 со специально разработанным для оснащения станков АИШ промышленным генератором мод.

ИТТ-35, используемым в качестве источника технологического тока в зоне автономной правки инструмента.

При этом технологическая схема АИШ с присущим ему подключением положительного полюса источника тока к шлифовальному кругу реализуется в автономном правящем контакте электрода (анод) с рабочей поверхностью круга. Выступающие над уровнем связки рабочей поверхности круга зерна сверхтвердого абразива не позволяют идеализировать правящий контакт как только скользящий, полностью исключая вероятность тонких стружечных срезов с поверхности электрода, продукты которых, по сравнению с зонально совмещенной с резанием электроэрозионной правкой, когда в разрядную цепь в роли катода включается непосредственно объект обработки, могут увеличивать объем электроэрозионного вмешательства для обеспечения необходимого уровня связки с эффективным выступанием над ней массива режущих зерен. Или, при одних и тех же дополнительных энергозатратах, по сравнению с реализацией АИШ потенциально вынуждает соглашаться с менее эффективным очищением рабочей поверхности круга, а значит и с недостаточной высотной реновацией режущего рельефа шлифовального круга. В [129, 130] отсутствует какая-либо информация в этом контексте, а также обуславливающие такую информацию физические характеристики автономного правящего контакта (материал анодной щетки, усилие ее прижима к рабочей поверхности шлифовального круга, потенциал глубин возможного внедрения выступающих над уровнем связки алмазных зерен в поверхность контртела (анодной щетки) правящего контакта и обусловленная остротой контактных кромок абразивных зерен осуществимость в связи с этим стружечного микрорезания-царапания материала анодной щетки. Рабочей средой контактов шлифовального круга в зонах резания и автономной правки [129, 130] служил 0,3 %-ный водный раствор кальцинированной соды, подаваемый в каждую из зон через отдельное сопло.

В работе [129] рассмотрена оптимизация режимов алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 с учетом нестационарности процесса, обусловленной изменением во времени режущей способности рабочей поверхности шлифовального круга. Выбор марки обрабатываемой стали (Р6М5Ф3) поддерживает актуальность исследования ее отношением к группе быстрорежущих сталей повышенной производительности, наряду с такими как Р18К5Ф2, Р18М5Ф2, Р14Ф4, Р12Ф3, 11Р3АМ3Ф2, Р6АМ5Ф3). Для оптимизации использовано врезное шлифование по упругой схеме с постоянной силой поджима заготовки к рабочей поверхности круга, кинематика которого аналогична шлифованию по жесткой схеме. Область возможных режимов алмазного шлифования по упругой схеме в начале обработки рассмотрена в системе координат скорость детали – сила поджима заготовки.

Скорость детали с использованием методики [131] определена заданным значением шероховатости обработанной поверхности изделия. В этом назначении скорости детали, аналогично рассматриваемому в разделе 6 методическому подходу, принимается во внимание, что в процессе шлифования с увеличением времени обработки  $\tau$  среднеарифметическое отклонение профиля обработанной поверхности  $Ra$  уменьшается, достигая определенной стабильной величины [132]. Это обусловлено уменьшением разновысотности зерен на рабочей поверхности круга с последующей ее стабилизацией. Использование скорости детали, определенной по заданному детали значению средней высоты неровностей профиля  $Ra$ , и параметров рабочей поверхности круга, сформированных во время электроэрозионной правки и характеризующихся большей разновысотностью, приводит к уменьшению производительности обработки, поскольку в таких случаях требуется преодолевать рассогласование фактической и необходимой разновысотности. В результате уменьшения разновысотности параметр  $Ra$  будет уменьшаться.

Сила поджима заготовки в оптимизационном исследовании [129] выбрана минимальной, исходя из условий обеспечения отсутствия окисления алмазов,

неразрушения алмазных зерен, отсутствия фазово-структурных превращений в поверхностном слое обрабатываемого материала.

Выбор усилия поджима заготовки по [129] производится соответственно максимально возможной глубине шлифования, вычисляемой разрешением трансцендентности с неявной зависимостью относительно фактической (исходной) глубины шлифования по методике, приведенной в [133]. Расчетная модель шлифования является интеграционным отображением массового микрорезания одновременно контактирующими с заготовкой отдельными режущими зернами общим количеством  $z_p$  и опирается на известность максимальной толщины среза  $a_z$  и учет площади  $f_3$  зоны контакта задней поверхности зерна с заготовкой (согласно принятой [133] модели режущей части зерна  $f_3 = b \cdot l_3$ , где  $b$  и  $l_3$  – соответственно ширина единичного среза и длина площадки контакта на зерне). Этот выбор предусматривает, что условием отсутствия фазово-структурных превращений в материале заготовки, происходящих при превышении в нем некоторой критической температуры  $T_{кр}$ , в производительных процессах шлифования является выполнение следующего неравенства для температуры  $T$  на поверхности резания [134]:  $0,95T_{кр} < T < 1,00T_{кр}$ .

Пороговое значение усилия поджима заготовки к рабочей поверхности круга из механической прочности алмазных зерен по [129] производится на основе методик [135, 136], разработанных для сферической модели зерна с учетом ограничений нагрузки на него на поверхности рабочего контакта исходя из разрушающих его давления  $[p]$  и предельной толщины среза им  $a_{z пр}$ , с принятием во внимание расстояния  $S_{з.п.}$  между зернами на рабочей поверхности круга и площади  $S$  зоны контакта заготовки со шлифовальным кругом в интеграционном отображении массового микрорезания.

Пороговое значение усилия поджима заготовки к рабочей поверхности круга из недопустимости достижения температуры  $T_{ок}$  окисления алмазных зерен по [129] производится на основе принятой в [137] расчетной модели,

исходя из цилиндрической (круговой) цилиндра диаметром  $d$  и высотой  $h$ ) модели зерна наиболее вероятного размера, длины  $l$  дуги рабочего контакта единичного зерна и по средней температуре рабочего и нерабочего торцов имитирующего зерно цилиндра, с принятием во внимание поверхностной плотности  $n_p$  режущих зерен на рабочей поверхности круга и ширины  $B$  шлифования в интеграционном отображении влияния на температурную напряженность в зоне шлифования массового микрорезания.

Нестационарность процесса в оптимизационном исследовании [129] учитывали, используя уравнения, описывающие изменение во время обработки текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга.

Используемый [129] расчет средней величины  $I_{cp}$  тока электроэрозионных воздействий, обеспечивающих удаление продуктов засаливания из межзеренного пространства, защищен патентом [138]. В соответствии с [138] искомая величина  $I_{cp}$  повышается в задачах обеспечения эффективной режущей способности алмазно-абразивных инструментов с большей рабочей поверхностью (повышением диаметра  $D_k$  и высоты  $B_k$  шлифовального круга), уменьшается с ростом относительной концентрации алмазов  $K$  (уменьшением площади поверхности связки на рабочей поверхности круга), величины  $U_{sm}$  напряжения на эрозионном промежутке, времени  $\tau_3$  утраты шлифовальным кругом режущей способности в результате изнашивания зерен и засаливания межзеренного пространства.

Как показано в [129], оптимальными параметрами режима шлифования по жесткой схеме кругом 1A1 250x76x15x5 AC6 100/80–100–M2-01 быстрорежущей ванадиевой стали P6M5Ф3 с управляющими электроэрозионными воздействиями в автономной зоне являются: сила тока  $I_{cp} = 6$  А, скорость круга  $v_k = 35$  м/с, скорость детали  $v_d = 6$  м/мин, вертикальная подача  $S_v$  изменяется дискретно, глубина шлифования  $t_\phi = 1$  мкм. Обработка при таких параметрах с использованием в качестве источника технологического тока генератора импульсов мод. ИТТ-35 и с охлаждением 0,3

%-ным водным раствором кальцинированной соды обеспечивает повышение производительности шлифования на участке приработки на 40%, а на участке со стабильным значением режущей способности рабочей поверхности круга – в 2 раза по сравнению со шлифованием без электроэрозионных воздействий.

От первого анонсирования разработки в 1972 г. [68] и последовавшей за ним первой официальной защитой диссертационного исследования процесса с новым термином «алмазно-искровое шлифование» [69], выполненного одним из авторов базового изобретения [68] А.Т. Калашниковым под совместным руководством также авторов [68] М.Ф. Семко и Н.К. Беззубенко, в НТУ «ХПИ» на кафедрах «Резание материалов и режущие инструменты» (ныне – «Интегрированные технологии машиностроения» им. М. Ф. Семко) и «Автоматизация и комплексная механизация машиностроения» (ныне – в составе объединенной кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты») накоплен обширный опыт разработки и сопровождения внедрения модернизированной и новой техники и технологий; подготовки и переподготовки персонала обслуживания внедряемой техники и технологий; выполнения наукоёмких заказов промышленности, научно-исследовательских и проектных организаций по изготовлению изделий из труднообрабатываемых материалов технологиями АИШ. Анализ и обобщение этого опыта содержат разделы 2-4 и 6.

Основу привлекательности реализации разработок в тематическом поле АИШ для машиностроительных, приборостроительных, станкоинструментальных и других предприятий (через создание специальных и модернизацию (расширение технологических возможностей) универсальных шлифовальных станков и производственных модулей, комплектующих такие станки и модули инструментов из сверхтвёрдых материалов и электрофизических систем специального (дополнительного) энергообеспечения; их эксплуатацию) составляют существенное повышение производительности алмазного шлифования и заточки (в 1,5-3 раза), режущей

способности и стойкости инструмента, вероятности бездефектной обработки, сокращение удельных энергозатрат на механическую обработку, повышение фондоотдачи производственного оборудования и производственных площадей, высвобождение обслуживающего персонала – при дополнительных затратах на модернизацию станка и оснащение его источником (генератором) дополнительной энергии общим объёмом дополнительных затрат 20-25% стоимости обычного оборудования.

В исторической ретроспективе АИШ внедрение разработки концентрировалось на двух основных направлениях:

- промышленные технологии комбинированного шлифования деталей и заточки инструмента (преимущественно предприятия станкоинструментальной и приборостроительной отраслей Украины и России, в том числе ведущие – Полтавский алмазный завод, Изюмский приборостроительный завод и др.);
- рекомендации и технические задания для создания специальных шлифовальных и заточных станков и производственных модулей (ЭНИМС (г. Москва, Россия) и станкостроительные предприятия Украины, России, Беларуси, Армении, Литвы).

Только от выпуска и реализации в промышленности в 1984-1990 гг. 400 специальных станков-полуавтоматов модели 3В624 (Мукачевский станкостроительный завод) годовой экономический эффект в сопоставимых ценах превысил 1,7 млн. долларов США. В целом по промышленности за период 1981-1990 гг. известный суммарный экономический эффект превысил 2,5 млн. долларов США, в том числе свыше 450 тыс. долларов США – за счёт внедрения промышленных технологий комбинированного шлифования и заточки в условиях модернизации универсального оборудования [60, 139].

В 1998-2005 гг. в условиях филиала НТУ «ХПИ» на ГП ХМЗ ФЭД, а также на базе изучения организации производства и производственной номенклатуры ОАО «Харьковский станкостроительный завод» были

разработаны научно обоснованные рекомендации по назначению технологических параметров комбинированного алмазного шлифования, предложены и включены в производственный цикл прогрессивные технологии ряда изделий авиа- и станкостроения, в том числе из труднообрабатываемых сплавов и с повышенными требованиями к точности и качеству обработки. Эта совместная разработка харьковских политехников и заводчан представлялась и отмечена дипломом на региональной выставке-ярмарке «Наука Харьковщины – 2000» (23-25 февраля 2000 г.), а также на ряде других региональных, национальных и международных выставок 2000-2006 гг. в Харькове, Киеве, Москве.

В 1991-2000 гг. только по предприятиям авиационного машиностроения в г. Харькове, Харьковской и Луганской областях подтвержденный годовой экономический эффект от внедрения разработки составил свыше 1,1 млн. руб. в ценах 1991 г., а после 2001 г. – только по г. Харькову, и только в станкостроительном и авиамашиностроительном сегментах промышленности – свыше 750 тыс. грн. или ок. 100 тыс. долларов США.

В продвижении разработки в промышленность наряду с НТУ «ХПИ» и его филиалами на промышленных предприятиях г. Харькова участвуют и иногородние воспитанники и партнеры харьковской научной школы физики процессов резания по ее развитию и адаптации к конкретным научно-производственным задачам. Например, усилиями доц. С. М. Братана (ныне профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения СевНТУ) и асп. А. П. Фалалеева (ныне профессор, проректор по научной работе того же университета) в 1996 г. разработка получила «прописку» в АО Судоремонтный завод «Залив» (г. Керчь) [140], и т.д.

Внедрение ближайших новых результатов (2011 г.), полученных под руководством проф. М. Д. Узунына на кафедре-основателе метода АИШ его молодыми исследователями [141, 142], только по первому опыту заточки на Харьковском электротехническом заводе «Укрэлектромаш» твердосплавных



инструментов из ультрасовременного монокристалла вольфрама с субмикроскопической и наноразмерной структурой и повышенной плотностью компактирования [143], обеспечиваемыми передовыми технологиями электроспекания под давлением, оценено предприятием в 46,8 тыс. грн. годового экономического эффекта [141].

Комплекс выполненных исследований и сформировавшихся по их результатам физических представлений о рабочих процессах АИШ, помимо резания материалов, способствует развитию и других научно-технических отраслей, в том числе современного инструментального материаловедения: подбор рациональных давлений плотной консолидации порошков из тугоплавкой инструментальной керамики в циклах электроспекания с прямым токоподводом, реализуемых в отношении объектов получения [143] и последующей окончательной обработки [141], следует производить с учетом впервые установленного [144] определенного подобия функций электрического разряда в технологиях электроконсолидации порошковых инструментальных материалов и АИШ.

И наоборот, анализ современных межотраслевых тенденций и перспектив научно-технического развития открывает принципиально новые возможности организационно-технологического развития АИШ. Используемые в практике военного дела и аналитико-прогностических оценках космогенных катастроф современные представления о взрыве металлов при сверхвысокоскоростном ударе [145] позволяют предвосхищать и проводить предварительные теоретические исследования с новыми акцентами в организации процессов разрушения металлов в рабочей зоне АИШ и других видов комбинированной обработки, использующих высокоскоростные процессы воздействия на металл и электрические поля и токи в зоне обработки (например, процессы электроэрозионной обработки), а именно с использованием взрыва металла силой механического или электрического воздействия как одной из перспективных технологических доминант в механообработке [146]. Несмотря на то, что такие, комбинированные взрывными эффектами потенциальные

технологии АИШ пока неосуществимы при современном уровне технически достижимых скоростей шлифования, понимание отдаленной перспективы такого развития стимулирует поиск других комбинированных альтернатив в том же направлении взаимного дополнения и усиления эффектов механических и электрических воздействий, что является органической основой непревзойденных преимуществ АИШ, с достижением качественно нового интегрального результата, в особенности с избирательным предразрушением и разрушением металла, позволяющим создавать рабочие процессы повышенной продуктивности, устойчивости и управляемости.

Метод АИШ, отмеченный Кабинетом Министров Украины в рамках посвященной 20-летию независимости страны общегосударственной акции «Барвыста Украина» как «Лучший отечественный товар 2011 года», реально является конкурентоспособным источником эффективных комбинированных рабочих процессов и технологических решений такого рода в современной экспериментальной и широкой промышленной алмазно-абразивной практике изготовления изделий из труднообрабатываемых материалов.

В разработке АИШ, более сорока лет назад шагнувшего в мир техники и технологий из основанной проф. М. Ф. Семко харьковской научной школы физики процессов резания, в разные годы приняли участие десятки сотрудников ряда кафедр и лабораторий Харьковского политехнического института. Она стала достойным всесоюзным детищем в эпоху СССР, продолжается в новом веке, заслуженно является гордостью НТУ «ХПИ», и нет никакого сомнения, что и число ее энтузиастов, и ряд поддерживающих ее практику и развитие научно-производственных институций еще многие годы будут произрастать, как не исчерпает себя и сам метод АИШ – одна из многих искорок светлой памяти о проф. М. Ф. Семко и проф. Н. К. Беззубенко, открывающий своим исследователям все новые и новые грани технологических, экономических и экологических возможностей и перспектив.

К сложившимся в научной школе физики процессов резания НТУ «ХПИ»

представлениям о перспективах развития АИШ присоединяются и другие современные исследователи этого метода, например авторы обзорной статьи [147] из Харьковского национального экономического университета им. Семена Кузнеця.

В 2013-2014 гг. в НТУ «ХПИ» под руководством проф. А. И. Грабченко, возглавившего после проф. М. Ф. Семко кафедру-основателя метода, при государственной финансовой поддержке по плану НИОКР Министерства образования и науки, молодежи и спорта выполнен проект «Разработка технических решений специальной модернизации универсальных станков и технологических баз данных для алмазно-искрового шлифования труднообрабатываемых материалов» (тема М2240 в текущей идентификации НИОКР в НТУ «ХПИ») [4], в результатах которого в экспертных отзывах на проект и в ходе его выполнения проявили заинтересованность ряд промышленных предприятий г. Харькова, в том числе представляющие государственный сектор экономики «Завод имени В. А. Малышева», Харьковский машиностроительный завод «ФЭД» и Завод «Электротяжмаш».

1.3. Анализ существующих теоретических подходов к прикладному математическому моделированию и оптимизации параметров операций шлифования

Применительно к операциям алмазного шлифования важные теоретические результаты получены в работах А. К. Байкалова [148, 149]. Им разработаны кинематическая и динамическая математические модели формирования параметров режущего рельефа алмазного круга в процессе шлифования. Раскрыта связь параметров режущего рельефа алмазного круга с геометрическими параметрами срезов отдельными зернами круга, что имеет большое научное значение. Однако разработанные математические модели справедливы для обычного алмазного шлифования, т. е. шлифования алмазными кругами, устойчиво работающими в режиме самозатачивания.

Вопросам математического моделирования и оптимизации параметров процесса алмазного шлифования посвящены также многочисленные работы ученых Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины [32, 34, 37, 42, 47-49, 58, 150, 151]. Однако, они в большей мере направлены на поиск оптимальных условий обычного алмазного шлифования, на требующего введения в зону резания или автономно дополнительной электрической энергии для поддержания в процессе шлифования высокой режущей способности алмазного круга на металлической связке.

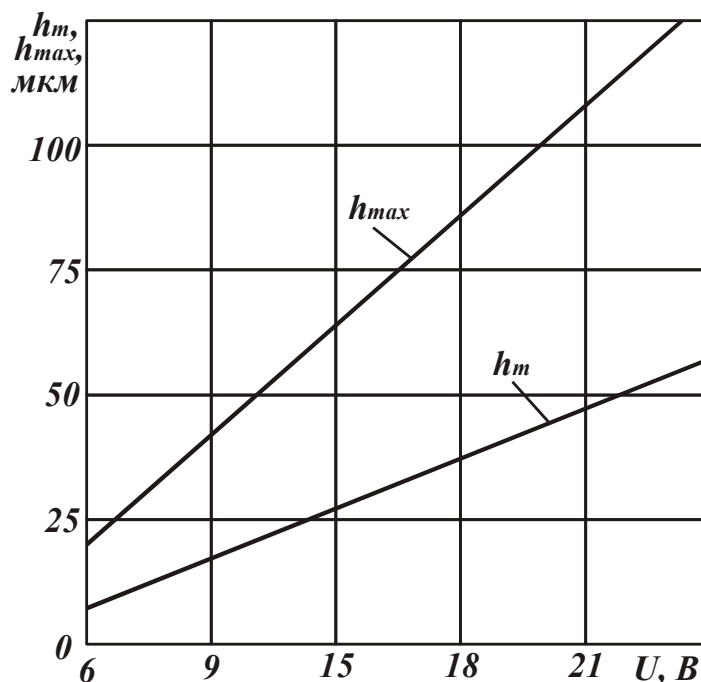


Рис. 1.6. Зависимости модальной  $h_m$  и максимальной  $h_{max}$  высот выступания зерен от напряжения

Важные результаты по математическому моделированию и оптимизации параметров АИШ получены в НТУ“ХПИ”. Особо следует выделить работы Н. П. Иванова, Л. Е. Кобзаря и И. С Сальтевского [68, 72, 152], в которых раскрыта физическая сущность АИШ и сформулирован принципиальный подход к моделированию и оптимизации параметров указанного процесса, учитывающий во взаимосвязи механические и электрические параметры обработки, рис. 1.6. Однако данный подход по своей сути является расчетно-

экспериментальным, поэтому позволяет обоснованно производить выбор оптимальных параметров обработки лишь для вполне конкретных частных условий шлифования.

Теоретические подходы к математическому моделированию и оптимизации параметров АИШ разработаны в работах проф. Н. К. Беззубенко [60], проф. М. Д. Узуняна [66], проф. П. Г. Матюхи [33, 71] и других исследователей. Применение данных подходов позволило более углубленно раскрыть физическую сущность АИШ, выявить основные физические факторы, определяющие эффективность данного метода шлифования. На основе выполненной оптимизации параметров процесса доказана перспективность применения схем двойного скоростного и глубинного шлифования алмазными кругами на металлических связках при условии введения в зону резания дополнительной электрической энергии в форме электрических разрядов [60], рис. 1.7.

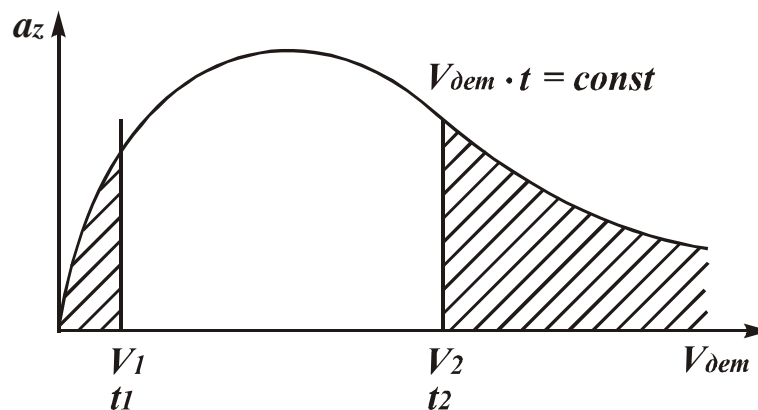


Рис. 1.7. Зависимость толщины среза  $a_z$  от скорости детали  $V_{dem}$

Вместе с тем, в указанных работах четко теоретически не обоснованы параметры, определяющие условия формирования основных технологических и физических показателей АИШ, т.е. теоретически четко не обоснованы параметры процесса, за счет которых создается эффект АИШ. Как правило, предпочтение отдается одному из параметров рабочей поверхности алмазного круга — максимальной высоте выступания режущих зерен над уровнем связки

круга. Считается, что чем больше эта величина, тем больше глубина внедрения режущих зерен в обрабатываемый материал, тем лучше вмещаемость образующихся стружек в межзеренном пространстве круга и, соответственно, выше производительность и качество обработки.

Между тем, в работах проф. Ф. В. Новикова [36, 56, 153-159] теоретически и экспериментально показана исключительно важная (определяющая) роль величины линейного износа зерен до момента их объемного разрушения и последующего выпадения из связки круга (или, в зависимости от механизма износа круга – преждевременного выпадения из связки малоизношенных зерен без их объемного разрушения) в формировании основных показателей алмазного шлифования: производительности и качества обработки, удельного расхода алмаза и себестоимости обработки, силы и температуры резания и т. д. Указанная величина положена, по сути, в основу расчета оптимальных параметров различных операций алмазного шлифования и, вполне очевидно, может быть использована для анализа, моделирования и оптимизации параметров АИШ.

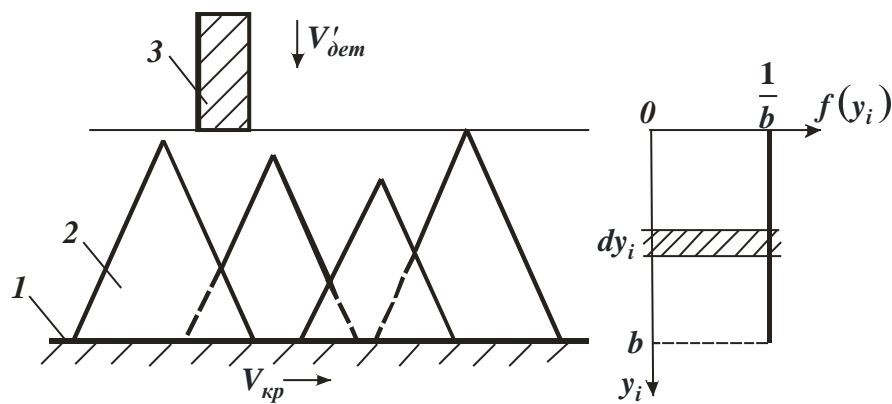
При этом чрезвычайно важно теоретически и экспериментально обосновать роль данной величины в формировании основных показателей АИШ, показать ее место в ряду других физических параметров АИШ, которые определяют условия функционирования процесса обработки. Полученные результаты в этом направлении позволят определить основные параметры обработки, которыми эффективно управлять в процессе АИШ наибольшего эффекта от введения в зону резания дополнительной электрической энергии в форме электрических разрядов. Полученные результаты также позволят разработать инженерную методику расчета оптимальных параметров операций АИШ.

Учитывая важность теоретического подхода, предложенного проф. Ф. В. Новиковым, рассмотрим его основные положения.

В процессе шлифования в связи с износом зерен и связки происходит

изменение параметров режущего рельефа круга. Доказано, что для каждого режима шлифования, обрабатываемого материала, характеристики круга устанавливается вполне конкретный режущий рельеф, определяемый уровнем энергетического равновесия системы «круг – деталь». Для анализа закономерностей формирования режущего рельефа круга в процессе шлифования предложена расчетная схема, в которой скорость износа связки равна скорости износа зерен.

Методика расчета состоит в следующем. Выделен на рабочей поверхности круга слой зерен  $dn$ , имеющих высоту выступания над связкой  $(b - y_i)$  (рис. 1.8), и рассмотрено образование профиля от их наложения на сечение образца, совпадающее с диаметральной плоскостью круга. При взаимном горизонтальном движении  $dn$  зерен и радиальном движении образца на его сечении будут образовываться срезы различной толщины, подчиняющиеся равномерному закону распределения.



- 1 – уровень связки круга;
- 2 – режущее зерно;
- 3 – обрабатываемый образец

Рис. 1.8. Расчетная схема

Относительная полнота профиля элементарного среза от  $dn = n \cdot \frac{1}{b} \cdot dy_i$

зерен имеет вид:

$$\varepsilon_i(y) = \frac{dn \cdot [a_s + 2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot (y - y_i)]}{B}, \quad (1.1)$$

где  $a_s$  – величина площадки износа на зерне, м;  $2\gamma$  – угол при вершине конусообразного режущего зерна;  $B$  – ширина круга, м.

Суммарный профиль от таких срезов получен вероятностным суммированием, для чего осуществлен переход от вероятностной функции  $\varepsilon_i(y)$  к противоположной вероятностной функции  $\Phi_i(y) = 1 - \varepsilon_i(y)$ . Пользуясь теоремой умножения независимых случайных величин и интегрируя выражение  $[a_s + 2 \cdot \operatorname{tg}\gamma \cdot (y - y_a)]$  в пределах от  $y_a$  до  $y$  (где  $y_a$  – координата площадки износа на зерне), получено

$$\Phi(y) = \prod_{i=1}^{\infty} \Phi_i(y) = e^{-\frac{dn}{B} [a_s \cdot (y - y_a) + \operatorname{tg}\gamma \cdot (y - y_a)^2]}. \quad (1.2)$$

Вероятностная функция  $\Phi_{\text{общ}}$  от наложения проекций всех зерен, участв  $y_a$  ующих в резании, получена умножением вероятностной функции  $\Phi(y)$  от всех элементарных слоев зерен, представляя величину  $a_s$  выражением  $a_s = 2 \cdot \operatorname{tg}\gamma \cdot (y - y_a)$  и заменяя  $(y - y_a)$  на  $\eta \cdot (y - y_a)$ , где  $\eta = 0 \div 1$  – безразмерный коэффициент, характеризующий степень линейного износа зерна до его объемного разрушения или выпадения из связки круга без разрушения:

$$\Phi_{\text{общ}} = e^{-\frac{n \cdot \operatorname{tg}\gamma \cdot (1 - \eta^2) \cdot y^3}{b \cdot B \cdot 3}}. \quad (1.3)$$

Общее число зерен  $n$ , участвующих в резании при движении образца в слое зерен высотой  $b$ , равно

$$n = k \cdot B \cdot V_{\text{кр}} \cdot \frac{b}{V'_{\text{дет}}}, \quad (1.4)$$

где  $k$  – поверхностная концентрация зерен круга,  $\text{шт}/\text{м}^2$ ;  $b$  – максимальная высота выступания зерен над уровнем связки круга, м;  $V_{\text{кр}}$  – скорость круга, м/с;  $V'_{\text{дет}}$  – скорость подачи обрабатываемого прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга, м/с.

Максимальную глубину внедрения обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга  $H$  (отсчитывая ее от вершины исходного



(неизношенного) максимально выступающего над уровнем связки зерна), при которой на сечении образца образуется полный профиль, т.е. происходит полный сьем металла, установлена из условия  $\varepsilon(H) = 0,95$ :

$$H = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot b \cdot V'_{дет}}{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta^2)}} \quad (1.5)$$

где  $\eta = \frac{x}{H}$  – безразмерный коэффициент, учитывающий степень затупления зерна ( $\eta \rightarrow 0$  – для острого зерна,  $\eta \rightarrow 1$  – для затупленного зерна);  $x$  – величина линейного износа максимально выступающего над уровнем связки зерна, м.

Вводом  $H_0 = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot b \cdot V'_{дет}}{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр}}}$  из (1.5) получено

$$H = \frac{H_0}{\sqrt[3]{1 - \eta^2}} \quad (1.6)$$

Как видим, безразмерный коэффициент  $\eta$  зависит от соотношения  $x/H_0$ . Чем оно больше, тем больше  $\eta$  (рис. 1.9). При  $x/H_0 < 0,8$  безразмерный коэффициент  $\eta$  принимает значения, близкие к  $x/H_0$ . При  $x/H_0 > 0,8$  – значения, близкие к единице ( $\eta \rightarrow 1$ ). С увеличением отношения  $x/H_0$  значения  $\eta$  приближаются асимптотически к единице.

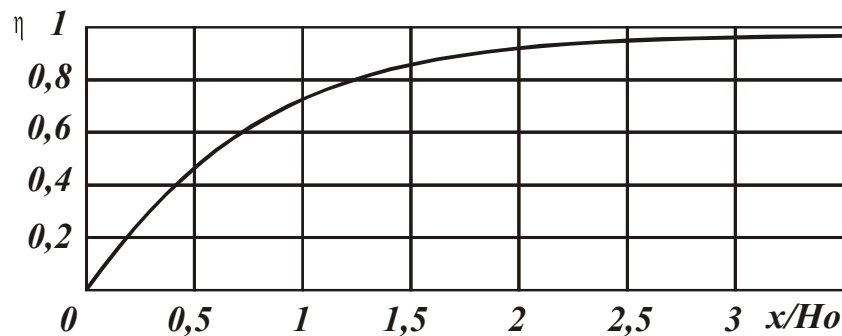


Рис. 1.9. График зависимости величины  $\eta$  от соотношения  $x/H_0$

Как следует из рис. 1.9, при  $x=H_0$  значение  $\eta = 0,75$ . Задавая значение  $H_0$  (например,  $H_0 = 1$ ), из рисунка 1.9 несложно установить взаимосвязь между

величинами  $x$  и  $\eta$ . Исходя из зависимости (1.5), несложно определить параметр  $H$ . Для  $H_0 = 1$  в табл. 1.2 приведены расчетные значения  $H$ .

Таблица 1.2. Расчетные значения параметра  $H$

$x$ , МКМ	0	0,25	0,55	0,99	1,55	2,05	3,7	$\infty$
$H$ , МКМ	-	1,0	1,1	1,32	1,72	2,16	3,74	$\infty$

Максимальная (вероятностная) толщина среза  $H_{max}$  определяется зависимостью:

$$H_{max} = (1 - \eta) \cdot H = H_0 \cdot \sqrt[3]{\frac{(1 - \eta)^2}{(1 + \eta)}}. \quad (1.7)$$

Как видно, с увеличением величины  $x$  максимальная (вероятностная) толщина среза  $H_{max}$  уменьшается. При  $x \rightarrow \infty$  справедливо условие  $H_{max} \rightarrow 0$ . Учитывая ограниченность величины  $x$ , параметр  $H_{max}$  принимает конечные значения.

Из проведенного анализа следует, что величина  $x$  оказывает на максимальную вероятностную толщину среза  $H_{max}$  значительное влияние, изменяя ее практически в неограниченных пределах. Это указывает на то, что при расчете параметра  $H_{max}$ , наряду с традиционными параметрами (режимами шлифования и характеристиками круга), необходимо учитывать величину линейного износа зерна  $x$ .

Параметры  $H_{max}$  и  $H_0$  связаны линейной зависимостью, а  $H_{max}$  и  $\eta$  – нелинейной. Параметр  $H_{max}$  тем больше, чем больше  $H_0$  и меньше безразмерная

величина  $\eta$ . Исходя из (1.6), множитель  $\sqrt[3]{\frac{(1 - \eta)^2}{(1 + \eta)}}$  можно рассматривать в качестве поправочного коэффициента, зависящего от степени затупления режущих зерен.

Таблица 1.3. Взаимосвязь параметров  $\eta$  и  $H_{max}$  при  $H_0=1$

$\eta$	0	0,25	0,5	0,75	0,9	0,95	0,99	1,0
$H_{max}$	-	0,75	0,55	0,33	0,17	0,11	0,04	0

Как следует из табл. 1.3, с увеличением безразмерного коэффициента  $\eta$  параметр  $H_{max}$  уменьшается. При  $\eta \rightarrow 1$  справедливо  $H_{max} \rightarrow 0$ . С одной стороны, по мере износа зерен, параметр  $H_{max}$  уменьшается, что позволяет уменьшить шероховатость обработки. С другой стороны, это ведет к прекращению съема материала, так как при условии  $\eta \rightarrow 0$  параметр  $H_{max} \rightarrow 0$ .

Этим показано, что износ зерен, определяемый величиной  $x$  и безразмерным коэффициентом  $\eta$ , оказывает существенное влияние на закономерности процесса шлифования.

Безразмерный коэффициент  $\eta$  определяется из предположения, что линейный износ круга происходит вследствие объемного разрушения зерен, которому обязательно предшествует их поверхностное разрушение. Предельная (разрушающая) нагрузка пропорциональна предельной площади поперечного сечения среза отдельным зерном круга  $S_{пред}$ , обусловленной собственно прочностью зерна или прочностью его удержания в связке круга (в зависимости от типа связки и механизма износа алмазного круга):

$$S_{пред} = tg\gamma \cdot H^2 \cdot (1 - \eta^2). \quad (1.8)$$

Решая совместно зависимости (1.5) и (1.8) с учетом  $\gamma=45^\circ$ , получено

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{k^2 \cdot V_{кр}^2 \cdot S_{пред}^3}{81 \cdot tg\gamma \cdot b^2 \cdot V_{дет}'^2}}. \quad (1.9)$$

Как следует из зависимости (1.9), с увеличением скорости  $V_{дет}'$  безразмерный коэффициент  $\eta$  увеличивается и стабилизация режущего рельефа происходит на большем удалении от вершины исходного максимально

выступающего зерна, т. е. прежде чем зерно объемно разрушится, оно претерпит значительный износ от истирания и микроскалывания кромок. Радиусы округления при вершинах таких зерен увеличатся и режущий рельеф станет более сглаженным. Полученный результат обусловлен тем, что с увеличением  $V'_{дет}$  предельная площадь среза, соответствующая разрушающей нагрузке, расположена на большем удалении от вершины исходного (неизношенного) зерна

$$H = \frac{9 \cdot b \cdot V'_{дет}}{k \cdot V_{кр} \cdot S_{пред}}. \quad (1.10)$$

Линейный износ зерна  $x$  и максимальная толщина среза  $H_{max}$  определяются следующими зависимостями (при  $tg \gamma = 1$ ):

$$x = \eta \cdot H = \sqrt{1 - \frac{k^2 \cdot V_{кр}^2 \cdot S_{пред}^2}{81 \cdot b^2 \cdot V_{дет}^2}} \cdot \frac{9 \cdot b \cdot V'_{дет}}{k \cdot V_{кр} \cdot S_{пред}}, \quad (1.11)$$

$$H_{max} = (1 - \eta) \cdot H = \left( \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{k^2 \cdot V_{кр}^2 \cdot S_{пред}^2}{81 \cdot b^2 \cdot V_{дет}^2}} \right) \cdot \frac{9 \cdot b \cdot V'_{дет}}{k \cdot V_{кр} \cdot S_{пред}} \right). \quad (1.12)$$

Подводя итоги проведенного краткого вводного экскурса в работы проф. Ф. В. Новикова, можно заключить, что используемый им подход открывает новые возможности в математическом моделировании и оптимизации операций алмазного шлифования.

#### 1.4. Основные прикладные задачи и рабочие гипотезы

Основные прикладные задачи, поддерживаемые данным исследованием, объединяет создание доказательной базы данных существующего опытно-экспериментального опыта и практики внедрений и применений метода АИШ в промышленности, об особенностях и возможностях метода в повышении производительности, стабильности, энергоотдачи, качества и экономической эффективности обработки различных материалов, прежде всего повышенной твердости, таких как сверхтвердые материалы, твердые сплавы, керамика,

износостойкие покрытия и наплавки и другие труднообрабатываемые, для активного использования этой базы данных в преодолении устаревших технологических стереотипов промышленности, побуждения к расширенному использованию метода, в том числе на базе реконструкции действующего станочного оборудования по законченной разработке конструкторской документации его модернизации [4].

Основные рабочие гипотезы, на которые опираются решения задач этого плана, сводятся к следующему:

– отечественная промышленность недостаточно использует прогрессивный метод АИШ в технологической практике, поэтому создание доказательной базы данных из существующего опытно-экспериментального опыта и практики внедрений и применений метода АИШ в промышленности, об особенностях и возможностях метода в повышении производительности, стабильности, энергоотдачи, качества и экономической эффективности обработки различных материалов, прежде всего повышенной твердости, в сочетании с предложением разработанной [4] электронной конструкторской документации на модернизацию наиболее распространенных универсальных станков шлифовальной группы для реализации АИШ в производстве изделий с плоскими и круглыми поверхностями, послужит эффективным инструментом преодоления имеющихся устаревших технологических стереотипов алмазно-абразивных технологий в изготовлении изделий из традиционных и новых труднообрабатываемых материалов;

– определение рациональных условий алмазно-абразивной обработки должно исходить из определенной взаимосвязи темпа износа связи и абразивных зерен в системе двухуровневого нормирования по соотношениям, регламентирующим постоянство процесса шлифования на макроскопическом (равенство скоростей понижение режущего рельефа и связки) и микроскопическом (скорость износа режущих зерен должна поддерживаться на стабильном уровне с определенным соотношением к скорости износа связи)

уровнях, чего следует придерживаться в испытательной и промышленной практике АИШ.

Таким образом, основная научная новизна работы базируется на использовании оригинальной научной концепции двухуровневого баланса соотношения скоростей износа абразивных зерен и связки шлифовального круга с точки зрения рациональной организации устойчивых процессов алмазного шлифования вообще и АИШ в частности.

Ожидаемым результатом от расширенного использования предложенных разработок является повышение производительности, стабильности, энергоотдачи, прогнозируемости и качества алмазно-абразивного резания инструментальных и других труднообрабатываемых токопроводящих материалов, в том числе в инструментальной промышленности, машино-, приборо- и авиастроении.

### 1.5 Общая инфраструктура технического обеспечения

Кафедра «Интегрированные технологии машиностроения» им. М. Ф. Семко, которая является базовой кафедрой выполнения представленных исследований, располагает самодостаточной по номенклатуре и состоянию материально-технической базой для выполнения таких работ: компьютерная поддержка выполнения аналитических, имитационных и расчетно-методических исследований базируется на современном машинном комплексе Intel Core 2 Quad 2.4 GHz , что в 2009 году получен кафедрой в рамках выполнения международного проекта Tempus application form Joint European Project 2006 "Компьютеризированный промышленный дизайн" (JEP 27198 2006), с использованием современных лицензионных программных продуктов британской фирмы Delcam Plc (которая является официальным партнером НТУ «ХПИ» с базовым представительством на кафедре и по конкурсному отбору предоставляет ее студентам старших курсов, аспирантам и научным сотрудникам возможность стажировок в своем учебном центре в

Бирмингеме), а также других всемирно известных и тоже лицензионных, в частности Pro / Engineer Wildfire v5 и ANSYS v 8.0.

Электронная конструкторская документация на модернизацию универсальных станков шлифовальной группы для реализации АИШ в изготовлении изделий с плоскими и круглыми поверхностями в соответствии с разработкой [4] выполнена с использованием САПР Аскон Компас-3D V15 (передовая версия, [160]). Произведенный выбор конкретной технической идеологии и интеллектуального собственника САПР базируется на трех основных источниках: целевой направленности создания и развития системы, ее популярности в среде потенциальных пользователей разработки и наличии легальных пользовательских прав у организации-разработчика электронной конструкторской документации (НТУ «ХПИ»).

Во-первых, система Компас-3D предназначена как раз для создания трехмерных ассоциативных моделей отдельных деталей и сборочных единиц, содержащих как оригинальные, так и стандартизованные конструктивные элементы [160].

Во-вторых, популярность системы в среде предприятий и организаций на постсоветском пространстве объясняется ее адекватностью и массовому уровню восприимчивости этой средой, и необходимому авангардному развитию и этой среды, и этих предприятий и организаций, что объясняется происхождением и нынешней дислокацией организации-разработчика системы (г. Санкт-Петербург, Россия).

В-третьих, легальность использования в НТУ «ХПИ» САПР Аскон Компас-3D следует из заключенного в 2013 году и действующего тройственного Договора о творческом научно-техническом сотрудничестве между ИСМ НАН Украины (координатор ст. науч. сотрудник, канд. техн. наук А. В. Кривошея), ООО «Аскон-КР» (координатор генеральный директор О. Н. Лысенко) и НТУ «ХПИ» (координатор заведующий кафедрой «Интегрированные технологии машиностроения» им. М. Ф. Семко, проф., д-р

техн. наук А. И. Грабченко). В основу этого договора положено продолжение прикладного анализа и синтеза систем зубчатых зацеплений, осуществляемое учениками проф. Б. А. Перепелицы в развитие ранее выполненных совместно с ИСМ НАН Украины прикладных исследований [161].

Базовая кафедра выполненных исследований обладает также обширным станочным парком, насчитывающим более 50 единиц техники для выполнения разнообразной механической обработки, включая 15 единиц заточных, плоско, оптико, внутри-, кругло- шлифовальных станков, три из которых, универсальные шлифовальные станки моделей ЗГ71 (плоскошлифовальный), ЗБ12 (круглошлифовальный) и ЗД642Е (заточной) использовались в натурном макетировании и (или) экспериментальных апробациях АИШ.

В качестве основных источников вводимой в зону резания электрической энергии использовались промышленные генераторы импульсов: широкодиапазонный модели ШГИ-40-440 и его адаптированный к практике АИШ компактный аналог модели НО.6506, специально разработанный в Украинском государственном проектно-технологическом и экспериментальном институте «Укроргстанкинпром» (ныне ООО «Институт Укроргстанкинпром»).

Контроль шероховатости обработанной поверхности осуществлялся профилометром-профилографом Surtronic 3+ фирмы Taylor-Hobson.

Сверхтвердые инструменты шлифования, используемые в экспериментальных исследованиях, – от отечественных производителей (ПАО «Полтавский алмазный инструмент» и ООО «Инстайл»).

В качестве охлаждающей жидкости в рабочих процессах шлифования служил 3%-ный водный раствор кальцинированной соды.

Электронная (РЭМ-200 и УЭМВ-100К), инструментальная металлографическая (МИМ-8 и МИМ-11) и универсальная измерительная (УИМ-21) микроскопия, а также рентгеновская дифрактометрия (Дрон-3М) осуществлялись в лаборатории физических методов исследования базовой кафедры выполнения исследований.



## ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОГО ВО ВРЕМЕНИ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

### 2.1. Параметризация рельефа рабочей поверхности шлифовального круга

С расширением технологических возможностей алмазного шлифования путём дополнения основного рабочего процесса электрофизическими эффектами, по применению главным образом ориентированными на трансформацию поверхности обработки и (или) инструментальной поверхности и использующими энергию, источником которой являются специальные (дополнительные) технические средства, требуемые уровни производительности и качества обработки с необходимой устойчивостью обеспечиваются в новых, расширенных диапазонах и управляющих (режимных) параметров, и управляемых (выходных) показателей.

Абсолютные значения и динамика изменения топографических характеристик объектов реформирования основным и дополнительным энергетическими потоками, определяющие связанные с ними показатели обработки, в особенности показатели расхода сверхтвёрдых абразивов, существенно отличаются от монотехнологий. Стабильной развитости режущего рельефа и режущей способности инструмента конкретной формы, размеров, характеристик шлифпорошка и алмазносной композиции, при заданной кинематико-геометрическими условиями номинальной производительности обработки, даже при оптимальном сочетании непосредственно определяющих её факторов (при круглом шлифовании в общем случае обработки по жёсткой схеме – продольная и поперечная подачи, линейная скорость поверхности обработки и круговая частота её вращения), на технологические (и экономические) показатели устойчивой работоспособности алмазного круга весьма существенное влияние оказывают и другие факторы, не находящиеся в строгой математической связи с номинальной (расчётной) производительностью обработки и не определяющие статические параметры

инструмента. Об этом свидетельствует ряд теоретических и экспериментальных исследований комбинированных методов алмазно-абразивной обработки [60, 61, 73, 162, 163], основанных на одновременном с классическим резанием-шлифованием воздействии той же физической (механической) природы (например, ультразвуковой осцилляцией рабочего контакта), иной (например, энергией электролитических реакций, электрических разрядов, лазерного излучения) или сочетанием видов энергий.

В технологиях электроэрозионного (алмазно-искрового) шлифования, основанных на введении в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов [60], необходимая стабилизация высотных характеристик режущего рельефа и работоспособности круга обеспечивается путём управления параметрами электрических импульсов благодаря интенсификации, во-первых, износа связки; во-вторых, действия смазочно-охлаждающих сред; в-третьих, диспергирования продуктов стружкообразования в зоне резания, а также частичному уничтожению последних в канале разряда. При этом управление параметрами дополнительного электрического воздействия, производимого в зоне обработки, электроэрозионного по сущности привносимой на обрабатываемую и обрабатывающую поверхности технологической (электродной) наследственности, является управлением необходимым дополнением (поддержкой) процессов естественной автогенерации режущего рельефа, когда они имеют затухающий характер и потому недостаточны для устойчивого самозатачивания [164].

Как показано в работах [165, 166], насыщение зоны резания электроразрядными процессами сверх необходимого уровня поддержки процессов регенерации режущего рельефа, достаточного для обеспечения устойчивой производительности обработки, приводит к необоснованному расходу и энергетических ресурсов, и сверхтвёрдого абразива, дополнительным материальным затратам. Повышение высоты рельефа рабочей поверхности

круга снижает вероятность удержания в связке алмазных зёрен под действием нагрузок рабочего контакта и, следовательно, среднее число единичных актов микрорезания каждым из них. Поэтому, когда высота рельефа рабочей поверхности круга превышает глубину внедрения в него обрабатываемого материала, обусловленную кинематико-геометрическими и физическими условиями контакта, уровень остроты алмазного круга, повышение и поддержание которой в принципе является главной физической задачей комбинирования шлифования, может оказаться чрезмерным.

Рассмотрим высотную схематизацию рельефа рабочей поверхности шлифовального круга, основываясь на известной модели проф. А. В. Якимова и др. [159].

Пусть действительная максимальная глубина взаимопроникновения режущего рельефа круга и снимаемого припуска (максимальная толщина среза) известна и равна

$$H_{\max} = H - \Delta_{\max}, \quad (2.1)$$

где  $H = y$  в системе координат, связанной с вершиной наиболее выступающего над уровнем связки зерна, мнимой в общем случае изнашивания рабочей поверхности шлифовального круга;  $\Delta_{\max} = y_a$ , причём  $y_a$  является ординатой привершинной площадки износа максимально выступающего зерна в той же системе координат (рис. 2.1, а).

Пусть известна также действительная максимальная высота выступания абразивных зёрен рабочей поверхности круга над уровнем связки  $b_{\max}$  и выполняется условие осуществимости резания – шлифования на всей глубине  $H_{\max}$ , т.е.

$$b_{\max} \geq H_{\max} \quad (2.2)$$

Тогда в аналитической топографии алмазного шлифовального круга будем использовать соотношение

$$\zeta = \frac{H_{\max}}{b_{\max}}. \quad (2.3)$$

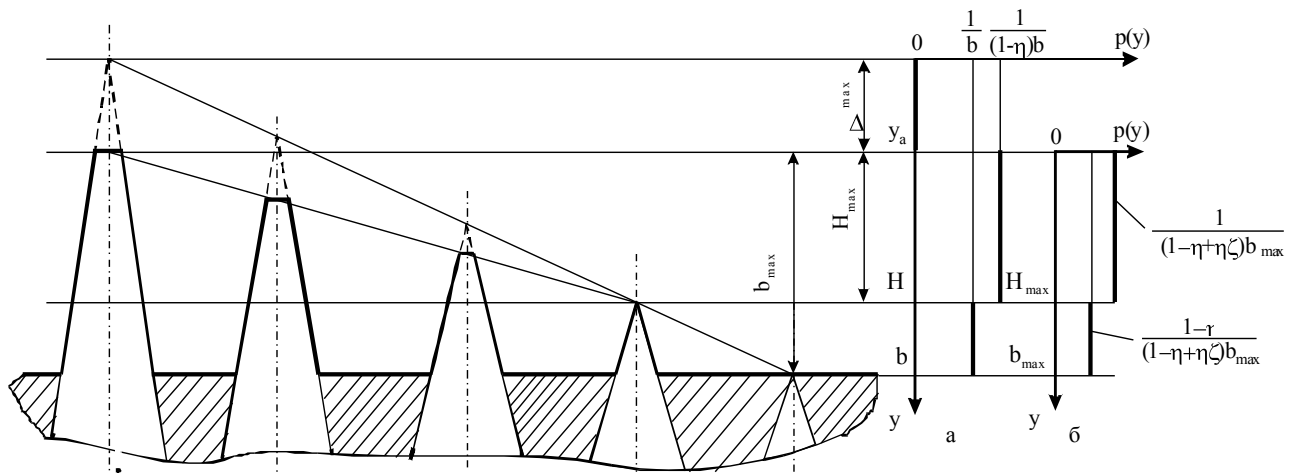
В общем случае

$$b_{\max} = b - \Delta_{\max}, \quad (2.4)$$

а в отсутствие износа вершин зёрен  $\Delta_{\max} = 0$ , из (2.1)  $H_{\max} = H$ , из (2.4)  $b_{\max} = b$  и

$\zeta = \zeta^*$ :

$$\zeta^* = \frac{H}{b}. \quad (2.5)$$



а)  $y=0$ : мнимая вершина наиболее выступающего зерна;

б)  $y=0$ : действительная вершина наиболее выступающего зерна

Рис. 2.1. Модель рельефа рабочей поверхности шлифовального круга.

Плотность распределения вероятности действительных вершин алмазных зёрен в системах координат, связанных с вершиной наиболее выступающего зерна

Полагая равномерным по  $b$  исходный (до шлифования с образованием площадок износа на режущих зёрнах) закон распределения вершин выступающих зёрен, при моделировании процесса шлифования с интерпретацией износа режущих зёрен по [159] коэффициентом

$$\eta = \frac{\Delta_{\max}}{H}, \quad (2.6)$$

это равномерное распределение с исходной плотностью вероятности

$$p(y) = \frac{1}{b} \quad (2.7)$$

трансформируется соответственно трансформации модели рельефа рабочей поверхности круга [159], рис. 2.1, а:

$$p(y) = \begin{cases} \frac{1}{(1-\eta)b} & \text{при } y_a < y < H; \\ \frac{1}{b} & \text{при } H \leq y < b. \end{cases} \quad (2.8)$$

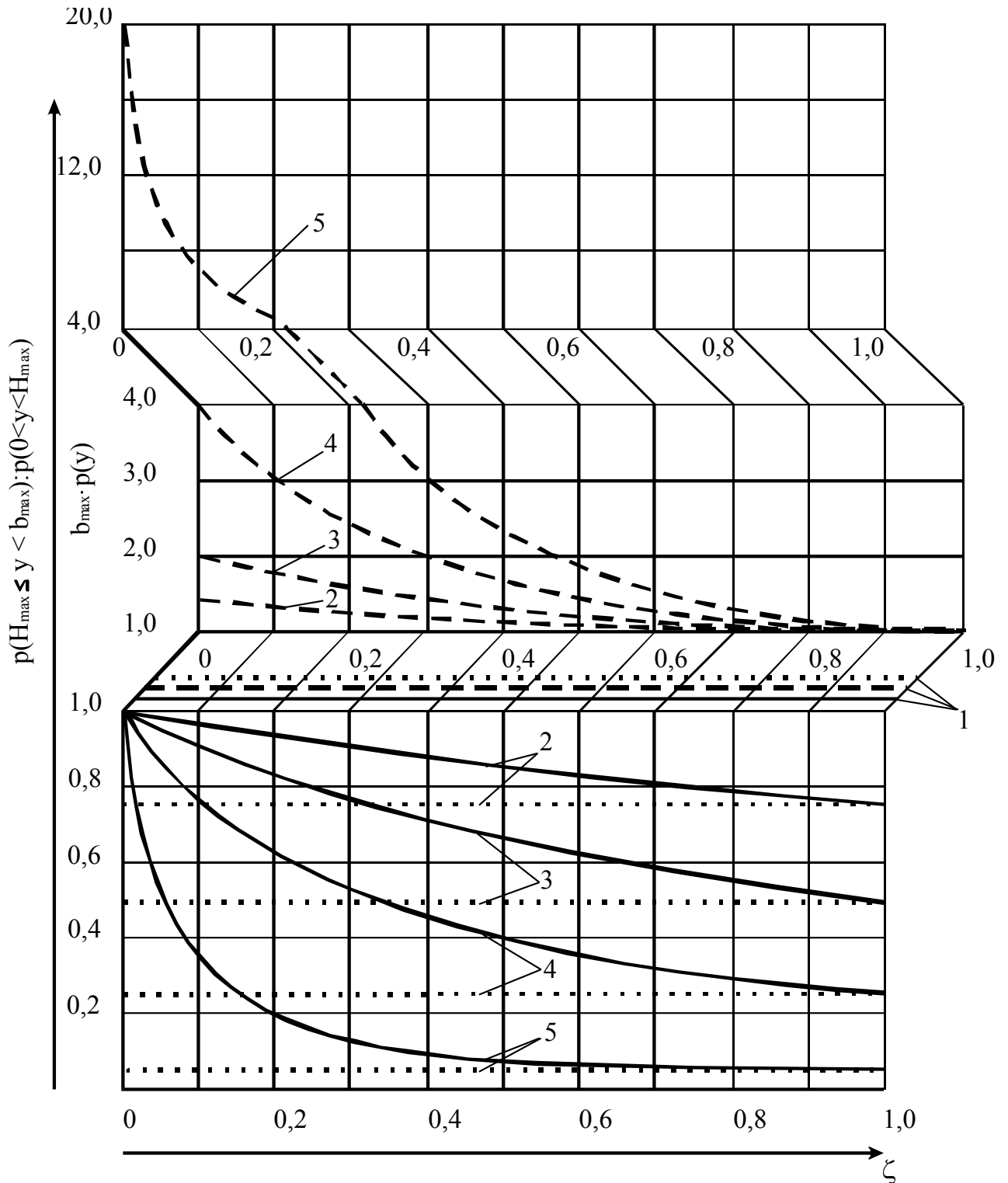
Учитывая (2.3) и (2.6), из (2.4) следует

$$b = \frac{(1-\eta + \eta\zeta)}{1-\eta} b_{\max}. \quad (2.9)$$

Тогда в новой системе координат, связанной с действительным максимумом высоты рабочего рельефа, когда вершины режущих зёрен изнашиваются, рис. 2.1, б:

$$p(y) = \begin{cases} \frac{1}{(1-\eta + \eta\zeta)b_{\max}} & \text{при } 0 < y < H_{\max}; \\ \frac{1-\eta}{(1-\eta + \eta\zeta)b_{\max}} & \text{при } H_{\max} \leq y < b_{\max}. \end{cases} \quad (2.10)$$

Таким образом, рассматриваемой модели износа рабочей поверхности шлифовального круга соответствует более высокая (в  $\frac{1}{1-\eta}$  раз) плотность вероятности равномерного распределения плосковершинных оконечностей режущих зёрен по сравнению с распределением ещё не вступивших в контакт с обрабатываемым материалом вершин зёрен исходной формы. Из (2.10) также следует, что с повышением уровня использования абразивных зёрен в рабочих процессах шлифования (ростом  $\eta$ ) отношение  $p(0 < y < H_{\max}):p(H_{\max} \leq y < b_{\max})$  увеличивается независимо от характера изменения  $\zeta$ , но абсолютные значения  $p(y)$  с ростом  $\zeta$  во всём интервале  $0 < \eta < 1$  уменьшаются и сходятся (рис. 2.2).



Участки рельефа и их отношение:

— — неизношенный; - - - - изношенный; · · · — отношение.

Высотная характеристика рельефа  $\eta$ :

1 — 0; 2 — 0,25; 3 — 0,5; 4 — 0,75; 5 — 0,95.

Рис. 2.2. Зависимость плотностей распределения вероятностей неизношенного и изношенного участков рельефа рабочей поверхности круга и их отношения от высотных рабочих характеристик рельефа

При этом в предельном случае  $\zeta = 1$ , когда имеет место трение – скольжение обрабатываемого материала и связки круга ( $H_{\max} = b_{\max}$ ), во всём интервале  $0 < y < b_{\max}$ :

$$p(y) = \frac{1}{b_{\max}}. \quad (2.11)$$

В общем случае комбинированного шлифования, когда контакт связки круга с обрабатываемым материалом исключён,

$$0 < \zeta < 1, \quad (2.12)$$

при фиксированном значении  $\eta$  абсолютные значения  $p(y)$  сходятся при  $\zeta \rightarrow 1$ , причём из (2.10) следует:

$$\lim_{\zeta \rightarrow 1} p(0 < y < H_{\max}) - p(H_{\max} \leq y < b_{\max}) = \frac{\eta}{b_{\max}}. \quad (2.13)$$

Относительное отклонение

$$\frac{\Delta p(y)}{p(y)} = \frac{p(0 < y < H_{\max}) - p(H_{\max} \leq y < b_{\max})}{p(H_{\max} \leq y < b_{\max})} \quad (2.14)$$

инвариантно  $\zeta$  и, как это следует из (2.10), составляет отношение

$$\frac{\Delta p(y)}{p(y)} = \frac{\eta}{1 - \eta}. \quad (2.15)$$

Высотная схематизация рельефа рабочей поверхности шлифовального круга по [159] исходит из вероятностного характера как самого процесса шлифования, так и параметров его аналитических описаний. Поэтому скачок (нарушение непрерывности) функции  $p(y)$  при некотором фиксированном значении  $y = H_{\max}$  и его количественная оценка являются не только отражением адекватности модели, но и следствием предполагаемых моделью нестабильностей  $b_{\max}$ ,  $H_{\max}$  и  $\eta$ , если такие предположения сформулированы. Если ограничить относительное отклонение (2.15) некоторой предельной мерой  $[\Delta p(y)/p(y)]$ , полагая модель приемлемой при

$$\frac{\Delta p(y)}{p(y)} < \left[ \frac{\Delta p(y)}{p(y)} \right], \quad (2.16)$$

то из (2.15) следует соответствующий предел  $[\eta]$  адекватности рассматриваемой модели при действии условия (2.12):

$$\eta = \frac{\Delta p(y)/p(y)}{1 + \Delta p(y)/p(y)} . \quad (2.17)$$

Критерий адекватности

$$\eta < \eta \quad (2.18)$$

для модели [159] оказывается весьма жёстким. Например, при допустимом уровне 15% для относительного расхождения (2.15), как следует из (2.17) и (2.18), должно соблюдаться условие  $\eta < 0,13$ . По работе [159] в табличных примерах с использованием значений  $\eta$ , рассчитанных в широком диапазоне условий обычного и комбинированного алмазного шлифования (всего 24 таблицы), минимальные значения  $\eta$  в примерах расчёта параметров обычной и комбинированной обработки соответственно равны 0,23 и 0,22 (относительное расхождение (2.15) не менее 28%).

Здесь не рассматриваются возможные усовершенствования приведенной износоконтактной модели рабочей поверхности шлифовального круга, это предмет отдельного исследования. Следует только заметить, что эти возможности связаны с отказом от фиксированного в пределах  $0 < y < H_{\max}$  значения  $\eta$  и предполагают его уменьшение по высоте рельефа, непрерывное или ступенчатое.

Физический смысл предельных модельных ситуаций рабочего контакта при идеальной износостойкости абразива ( $\eta = 0$ ) соответствует теоретическим пределам производительности обработки с нулевым минимумом и верхним ограничением соответственно высоте рельефа  $b$ . При  $\zeta = 0$  (нижний предел съём припуска отсутствует ( $H_{\max} = 0$ ), варианту идеальной износостойкости абразива соответствует  $\Delta_{\max} = 0$ , и зависимость (2.6), которую с учётом (2.1) можно представить в виде



$$\eta = \frac{\Delta_{\max}}{H_{\max} + \Delta_{\max}}, \quad (2.19)$$

обращается в неопределённость типа  $0/0$ . Из (2.3) следует, что  $\zeta \rightarrow 0$  при  $H_{\max} \rightarrow 0$ , что соответствует доводочным (суперфинишным) процессам обработки. В пределе  $\zeta = 0$  без удаления припуска может происходить его объёмное перераспределение (выглаживание) как проявление пластичности обрабатываемого материала в рабочем контакте с наиболее выступающими зёрнами инструментальной поверхности.

Следует заметить, что с расширением свободы модельных представлений о связке абразивонесущей композиции до псевдосвязки, обеспечивающей абразивоудержание (фиксацию) зёрен только в отсутствие каких-либо нагрузок на них, ситуация с  $\Delta_{\max} = 0$  и  $H_{\max} = 0$  возможна при осыпании абразивных зёрен уже при касании (первых встречах) с обрабатываемым материалом, независимо от основной (абразивной) функциональной потенции и обуславливающих эту потенцию физико-механических свойств абразива (твёрдость, прочность и др.).

При  $\eta = 0$  и  $\zeta = 1$  (верхний предел)  $\Delta_{\max} = 0$  независимо от  $H$  ( $H_{\max} = H$ ), режущая способность и износостойкость абразива идеальны, полнота съёма припуска определяется главным образом кинематико-геометрическими условиями рабочего контакта, с учётом его жёсткости, наличия и характера проявлений пластичности обрабатываемого материала (т.е. тем, насколько его пересечение поверхностью, описываемой абразивом, совпадает с поверхностью канавки, наследуемой обрабатываемой поверхностью после этого пересечения). Практические аналогии этой предельной ситуации безизносного производительного шлифования ( $\eta \rightarrow 0$ ,  $\zeta \rightarrow 1$ ,  $H_{\max} \rightarrow b_{\max}$ ) могут реализовываться при шлифовании сверхтвёрдыми инструментами сверххрупких материалов. Здесь можно заметить, как это следует из (2.3),

$H_{\max} \rightarrow 0$  при  $b_{\max} \rightarrow 0$ , поэтому и  $H_{\max} \rightarrow b_{\max}$ , что соответствует доводочным (суперфинишным) операциям, в отличие от доводки при  $\zeta \rightarrow 0$  осуществляемым инструментом с малоразвитым режущим рельефом.

В теоретическом пределе  $\eta \rightarrow 1$ , как это следует из (2.6) и (2.1),  $\Delta_{\max} \rightarrow H$  и  $H_{\max} \rightarrow 0$ . Практические аналогии – шлифование материалов равной твёрдости с твёрдостью абразива инструмента, алмазная обработка сверхтвёрдых материалов, когда производительные возможности рабочего процесса, износостойкость инструментального абразива и максимальные толщины среза невелики. При этом ситуации с  $\zeta \rightarrow 0$ , когда из (2.3)  $H_{\max} \ll b_{\max}$ , соответствуют относительно развитому рельефу рабочей поверхности круга, а с  $\zeta \rightarrow 1$ , когда по определению (2.3)  $H_{\max} \rightarrow b_{\max}$ , малым действительным высотам рабочего рельефа круга и доводочным технологиям.

С целью обеспечения устойчивой работоспособности инструмента и стабильной производительности обработки, в моделях управления рельефом рабочей поверхности шлифовального круга по рассмотренному типу предлагается исходить из нормирования триады высотных характеристик рельефа, формируемой выбором трёх из семи параметров по принципу относительной независимости избираемых компонентов триады (табл. 2.1).

Из общего числа всех различных состояний  $C_7^3 = 35$  оставлено 29. Как видно из табл. 2.1, исключения образованы теми из возможных сочетаний, где каждый из параметров однозначно связан с двумя другими по определению (2.4) и следствию из него (2.1), определениям (2.3) и (2.6), а также следствиям из (2.6) с учётом (2.1)

$$H_{\max} = \frac{1-\eta}{\eta} \Delta_{\max} \quad (2.20)$$

и

$$H_{\max} = (1-\eta)H. \quad (2.21)$$

Таблица 2.1. Триады высотных характеристик рельефа рабочей поверхности шлифовального круга  
(Z – параметрически независимые)

Параметр					Z				Z				Z				Z				Z											
$H_{\max}$	X	X	X	X																												
$b_{\max}$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
$\Delta_{\max}$	X								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
$H$																																
$b$																																
$\eta$																																
$\zeta$																																

По табл. 2.1 наибольшей частотой встреч в рекомендуемых триадах отличаются параметры  $b$  и  $\zeta$ . При этом  $b$  – мнимая характеристика действительного рельефа с ненулевым износом  $\Delta_{\max}$  наиболее выступающего зерна (рис. 2.1), соответствующая высоте рельефа с неизнашиваемыми зёрнами в идеализированных моделях шлифования или после неизнашивающей зёрна правки, например по одному из электрофизикохимических методов с избирательным воздействием на связку (электрохимическим [61], электроэрозионным [60], лазерным [162] и т. п.). В моделях реальных процессов с ненулевым износом  $\Delta_{\max}$  играет роль нормы отклонения действительной высоты  $b_{\max}$  от номинальной высоты  $b$ , а следующее из (2.4) отношение

$$\frac{b_{\max}}{b} = \frac{b - \Delta_{\max}}{b} \quad (2.22)$$

характеризует полноту использования номинальной высоты рельефа рабочей поверхности круга. Чем меньше  $\Delta_{\max}$ , тем в модельных представлениях при фиксированном значении  $b$  круг острее (больше действительное выступание над уровнем связки) и на микроуровне (каждое зерно), и на макроуровне (весь рельеф).

Параметр  $\zeta$  – комплекс действительных параметров по определению (2.3), дополняющий известную по [159] систему физических характеристик рельефа рабочей поверхности шлифовального круга. По определению (2.3) параметр  $\zeta$  можно рассматривать как коэффициент использования действительной высоты рельефа. В рассматриваемых моделях рабочих процессов с самозатачиванием алмазных шлифовальных кругов, сопровождающимся трением поверхности обработки и связки инструментальной поверхности ( $\zeta = 1$ ), предполагается участие в процессе резания всех зёрен, выступающих над уровнем связки.

В модельных интерпретациях отсутствия контакта связки круга и обрабатываемой поверхности ( $\zeta < 1$ ), с чем связаны основные преимущества технологий комбинированной обработки, долевое участие режущих зёрен  $N_{pz}$  в общем числе зёрен  $N_3$ , выступающих над уровнем связки, определится из (2.10), рис. 1,б:

$$\frac{N_{pz}}{N_3} = \frac{H_{max} \cdot p(0 < y < H_{max})}{H_{max} \cdot p(0 < y < H_{max}) + (b_{max} - H_{max}) \cdot p(H_{max} \leq y < b_{max})}; \quad (2.23)$$

после соответствующих подстановок  $p(y)$  и преобразований:

$$\frac{N_{pz}}{N_3} = \frac{\zeta}{1 - \eta + \eta\zeta}. \quad (2.24)$$

Линии равных значений  $\frac{N_{pz}}{N_3}$  в системе  $\eta$ - $\zeta$ , рассчитанные по (2.24),

представлены в машинном исполнении на рис. 2.3.

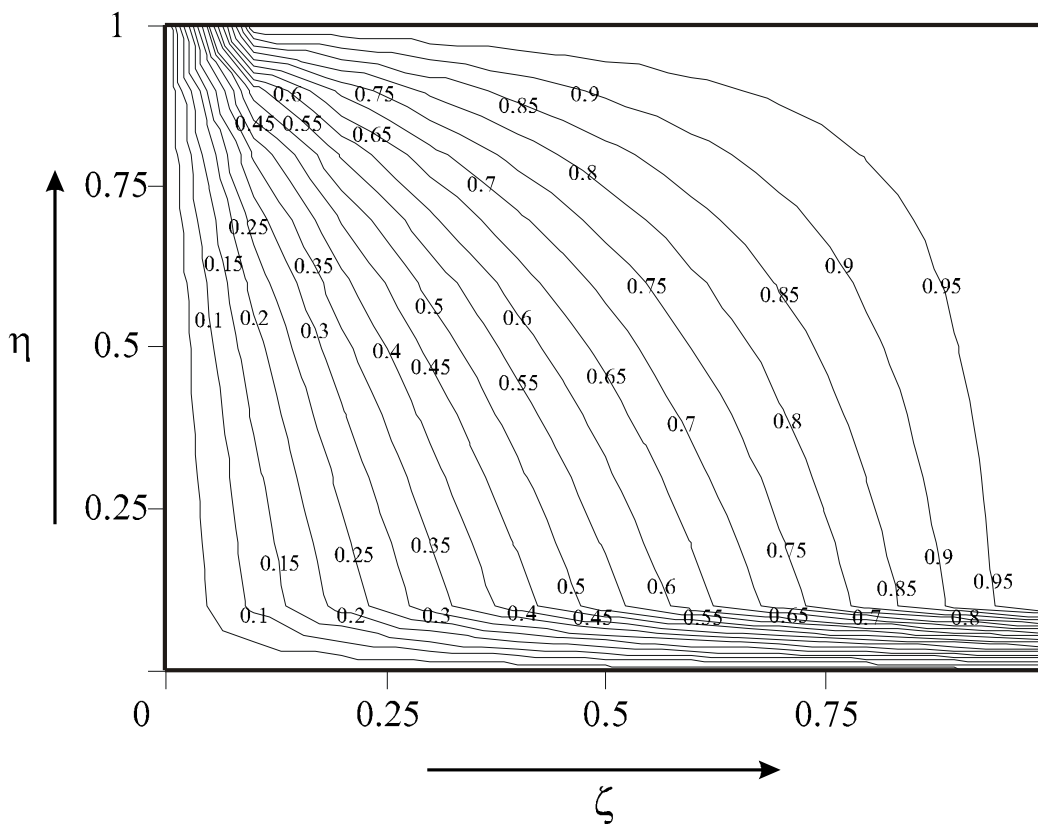


Рис. 2.3. Отношение числа режущих зёрен к общему числу зёрен на рабочей поверхности шлифовального круга при моделировании в системе  $\eta$ - $\zeta$

Показательно, что отношение  $\frac{N_{p3}}{N_3}$  значительно быстрее изменяется с изменением  $\zeta$ , нежели с изменением  $\eta$ . Из (24) следует, например, что в рамках рассматриваемой модели изменение условий  $\zeta = \eta = 0,1$  увеличением  $\zeta$  в 2 раза при том же уровне  $\eta = 0,1$  приводит к точно такому же увеличению доли режущих зёрен в общем числе зёрен рабочей поверхности круга, как и при увеличении  $\eta$  в 6 раз при неизменном  $\zeta = 0,1$ ; изменение условий  $\zeta = \eta = 0,2$  увеличением  $\zeta$  в 2,5 раза по изменению отношения  $\frac{N_{p3}}{N_3}$  эквивалентно увеличению  $\eta$  в 4 раза, и т.д.

Таким образом [167], оперирование коэффициентом использования действительной высоты рельефа  $\zeta$  в аналитической топографии шлифовального круга эффективно дополняет другие физические характеристики рельефа его рабочей поверхности в моделировании и обсуждении задач управления рельефом круга, расширяет возможности обоснования принятия решений в общем случае комбинирования обработки введением дополнительной энергии, когда с целью формирования благоприятной трибологии рабочего контакта инструментальной и обрабатываемой поверхностей стремятся к нетривиальности  $\zeta$ , т.е. к  $\zeta < 1$ .

## 2.2. Взаимосвязь износа и обновления режущего рельефа алмазного круга в устойчивом процессе шлифования

Применение электроэрозионных технологий алмазного шлифования позволяет решать задачи формообразования токопроводных труднообрабатываемых материалов, прежде всего благодаря возможности управления износом связки посредством регулирования параметров электрических импульсов, возбуждаемых в межэлектродном промежутке «шлифовальный круг – обрабатываемая заготовка» [60]. При этом скорость

износа связки  $v_{св}$  принято увязывать со скоростью износа режущих зерен  $v_{зер}$ . Однако, как правило, предметная область, к которой относится эта скорость износа, не оговаривается строго. Каждое (любое) зерно, выступающее над уровнем связки и участвующее в составляющих шлифование актах микрорезания, независимо от высоты выступания (микроскопический подход), либо весь режущий рельеф в целом (т.е. как бы «все зерна»), в оценке скорости понижения  $v_{зер}^*$  этого рельефа по изменению уровня наиболее выступающих зерен относительно уровня связки (макроскопический подход). Обычно чаще подразумевается или прямо имеется в виду второй подход. Сразу заметим, что  $v_{зер} = v_{зер}^*$  только в ситуациях износа (и участия в резании-шлифовании) лишь наиболее выступающих зерен, т.е., если это не вызвано режимными установками, когда внедрение режущего рельефа в обрабатываемый материал чрезвычайно затруднено относительно низкой обрабатываемостью шлифуемого материала (например, при обработке сверхтвердых материалов сверхтвердым же инструментом). В общем случае  $v_{зер} \geq v_{зер}^*$ , и проблема качественного (поверхностного) сопоставления  $v_{св}$  и  $v_{зер}^*$   $v_{св} = v_{зер}^*$ , скрывающая возможное чрезмерное обновление рельефа [168], трансформируется в физическую задачу количественного сопоставления  $v_{св}$  и  $v_{зер}$ , обнажающую соответствие кинематико-геометрических условий эксплуатации инструмента рациональным [125].

В контексте рациональной эксплуатации инструмента в процессах АИШ в работе [169] отмечается: «как правило, нормой скорости линейного износа связки принимается величина скорости линейного износа *наиболее выступающих режущих зерен*», т.е.  $v_{св} = v_{зер}^*$ .

В работе [170] то же положение сформулировано менее определенно с точки зрения отношения к скорости износа зерен на макроуровне (рельеф рабочей поверхности круга в целом) или на микроуровне (каждое зерно):

«Линейная радиальная скорость съема связки  $v_c$  должна быть увязана со скоростью износа вершин зерен, т.е. со средними значениями скорости их размерного износа в радиальном направлении  $v_{из}$  (буквально –  $v_{зер}$ ). При этом могут иметь место три характерных рабочих ситуации:

- 1) скорость износа зерен меньше скорости съема связки  $v_{из} < v_c$  ;
- 2) скорость износа зерен равна скорости съема связки  $v_{из} = v_c$  ;
- 3) скорость износа зерен больше скорости объема связки  $v_{из} > v_c$  .

В первом случае поверхность круга постоянно обновляется и обладает хорошей режущей способностью, но при повышенном расходе алмазов (как позже [125] было показано, это справедливо при некотором соотношении  $v_c > \eta \cdot v_{из}$  ,  $v_{из} \equiv v_{зер}$  ).

В третьем случае обновление режущей поверхности недостаточно. По мере работы инструмента высота выступания зерен из связки уменьшается, вплоть до полного затупления и засаливания круга.

Во втором случае высота выступания зерен постоянно поддерживается на определенном уровне, статистические характеристики параметров рельефа изменяются незначительно, стабильно сохраняется высокая режущая способность круга при умеренном его износе (в общем случае справедливо в трактовке  $v_{из} \equiv v_{зер}^*$  , с минимальным износом (максимальным ресурсом) круга при  $v_c = \eta \cdot v_{из}$  [125].

Учитывая ремарки в скобках, ясно, в каком смысле следует понимать резюме [170]: «Условие равенства скорости износа режущих зерен и скорости съема связки, определяющее целесообразные условия эксплуатации инструмента, может быть положено в основу расчета необходимой и дополнительной энергии при шлифовании».



В основополагающем исследовании [60], подводящем определенный итог многолетней работы харьковской школы физики процессов резания по разработке АИШ, четко сформулировано:

«В зависимости от интенсивности действия энергии электрических разрядов алмазный круг может работать по двум принципиальным вариантам:

– без затупления, в стабильном стационарном режиме постоянного полного обновления рабочего рельефа при неизменной режущей способности (работа выполняется при условии, если скорость съема связки больше скорости износа зерен ( $v_{cc} > v_{из}$ ));

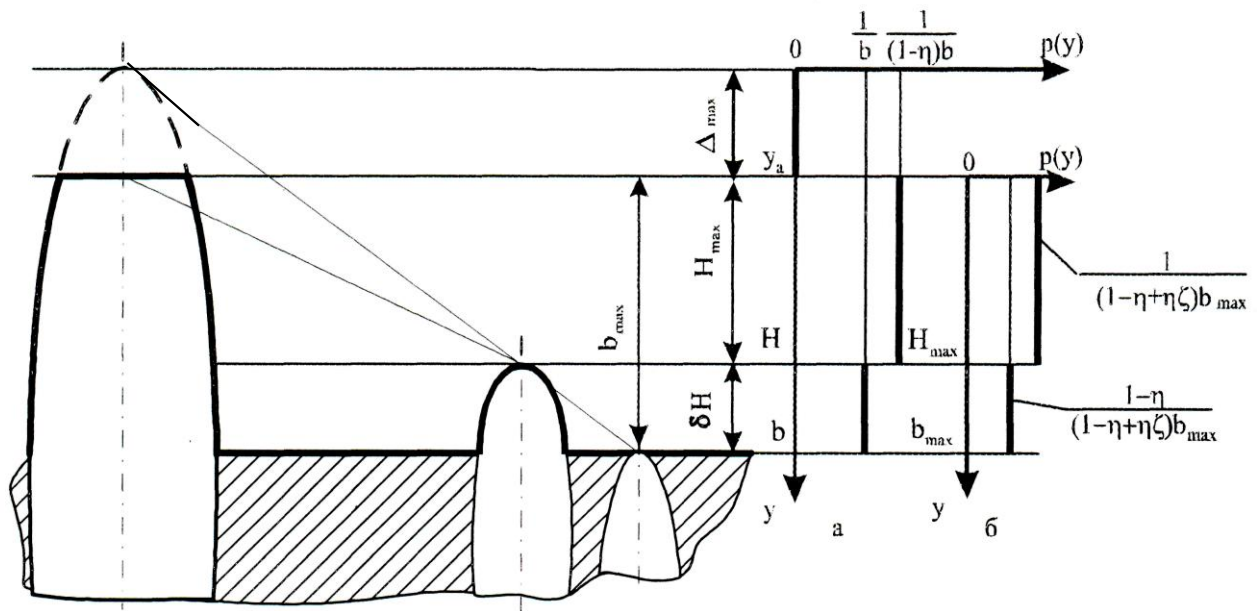
– с затуплением, в режиме частичного обновления рабочего рельефа при медленном постепенном уменьшении высоты выступания зерен и снижении режущей способности (работа выполняется при условии  $v_{cc} \leq v_{из}$  )».

Здесь можно заметить, что нюанс  $v_{cc} = v_{зер}$ , как условие стабильного стационарного режима постоянного полного обновления рабочего рельефа при неизменной режущей способности, проф. Н. К. Беззубенко не рассматривает, по-видимому, исходя из следующего: известная практика АИШ не распространялась, во всяком случае в исследуемом работой [60] факторном пространстве, на обработку алмазным инструментом таких материалов (тоже сверхтвердых), когда внедрение инструментального рельефа в обрабатываемую поверхность практически отсутствует, и процесс обработки лишь с определенной долей условности можно отнести к процессам обработки материалов резанием.

В работах [171-172] разрешающее шлифование соотношение сформулировано в виде  $v_{cc} \geq v_{зер}$ , т.е. в контексте доказательной логики [173], на которой остановимся ниже. Не противоречит этому и подход к назначению электрических параметров АИШ по допустимому расходу шлифовальных кругов и по условию  $v_{cc} = v_{зер}^*$  [174].

Получение и всестороннее обоснование строгого аналитического выражения соотношения  $v_{св}$  и  $v_{зер}$ , выполнение которого, наряду с поддержанием определенного постоянства высоты режущего рельефа круга, обеспечивает стабильность шлифования, представляет теоретический и практический интерес.

На рисунке 2.4 аналогично рисунку 2.1 и, в сравнении с ним, инвариантно исходной форме зерен, показана трансформация также предположительно равномерного исходного закона распределения вершин выступающих зерен с образованием привершинных площадок износа в процессе шлифования.



- а)  $y=0$ : мнимая вершина наиболее выступающего зерна;
- б)  $y=0$ : действительная вершина наиболее выступающего зерна

Рис. 2.4. Модель рельефа рабочей поверхности шлифовального круга. Плотность распределения вероятности действительных вершин алмазных зерен в системах координат, связанных с мнимой [175] и действительной [167] вершиной наиболее выступающего зерна (как инвариант исходной форморазмерной характеристики зерен)

В принципе модельная интерпретация рельефа рабочей поверхности шлифовального круга (закона распределения вершин зерен) с позиций рассматриваемой проблемы соотношения скоростей износа связки и зерен

может быть и иной, что не может повлиять на конечный результат, так как расчетная схема инвариантна форморазмерной характеристике зерна, и комплекс геометрических условий устойчивости шлифования (требование определенного постоянства как высоты рабочего рельефа круга, так и глубины его проникновения в снимаемый с обрабатываемой поверхности припуск) при этом не затрагивается.

Приведем доказательство стабилизирующего процесс шлифования соотношения  $v_{св}$  и  $v_{зер}$ . Для этого воспользуемся расчетной схемой [173], рис. 2.5.

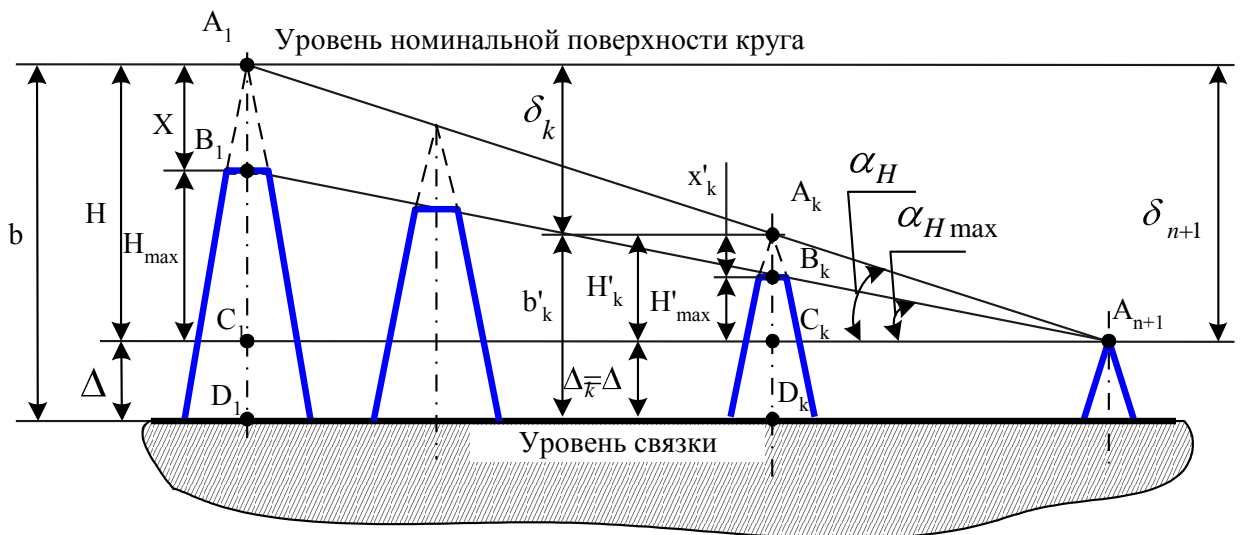


Рис. 2.5. Расчетная схема рабочей поверхности круга [173]

Приведение скорости износа связки  $v_{св}$  в соответствие со скоростью износа зерен  $v_{зер}$  в рамках принятой рассматриваемой моделью допущений и в версии  $\Delta = 0$  осуществляется из условия [176]

$$\frac{H}{v_{св}} = \frac{X}{v_{зер}} \quad (2.25)$$

и вытекающего из него соотношения

$$\frac{v_{зер}}{v_{св}} = \eta, \quad (2.26)$$

где  $\eta = X / H$  – безразмерный коэффициент, учитывающий степень затупления зерна,  $\eta \rightarrow 0$  для острого зерна,  $\eta \rightarrow 1$  для затупленного зерна.

Корректность установления соотношения (2.26), как универсального описания режущего этапа жизненного цикла каждого зерна рабочей поверхности круга в версии  $\Delta = 0$ , можно проследить из следующих рассуждений. Следуя (2.25), в момент выпадения наиболее выступающего из связки зерна (рисунок), которое определим как первое из выступающих из связки зерен, некоторому  $k$ -му зерну, следующему за ним в приведенном режущем профиле по модели [175], за некоторое время  $\Delta\tau$  предстоит завершить свой линейный износ до предельной величины

$$X = X'_k + v_{зеп} \cdot \Delta\tau \quad (2.27)$$

и, одновременно, подняться над связкой до предельной высоты, измеряемой до мнимого (предшествующего износу) положения вершины зерна,

$$H = H'_k + v_{св} \cdot \Delta\tau, \quad (2.28)$$

рис. 2.5. Тогда должно выполняться условие

$$\frac{H - H'_k}{v_{св}} = \frac{X - X'_k}{v_{зеп}}. \quad (2.29)$$

С использованием (2.25) получаем

$$\frac{H - H'_k}{H} = \frac{X - X'_k}{X},$$

откуда следует

$$\frac{H'_k}{H} = \frac{X'_k}{X}$$

или

$$\frac{H'_k}{H} = \frac{H'_k - H'_{\max k}}{H - H_{\max}}. \quad (2.30)$$

С другой стороны, если в рамках принятого допущения о равномерном законе распределения высот зерен над уровнем связки таких выступающих зерен ровно  $n$  в условиях непрерывной стабилизации режущего рельефа, то (рисунок), после выражения входящих в правую часть (2.30) параметров  $H$  и  $H_{\max}$ ,  $H'_k$  и  $H'_{\max k}$ , являющихся катетами соответствующих прямоугольных треугольников  $\Delta A_{n+1} C_1 A_1$  и  $\Delta A_{n+1} C_1 B_1$ ,  $\Delta A_{n+1} C_k A_k$  и  $\Delta A_{n+1} C_k B_k$ , через тригонометрические функции  $tg \alpha_H$  и  $tg \alpha_{H_{\max}}$ , получаем преобразование (2.30) в эквивалентную форму

$$\frac{H'_k}{H} = \frac{A_{n+1} C_k}{A_{n+1} C_1} \cdot \quad (2.31)$$

Равенство отношений (2.31) справедливо, если треугольники  $\Delta A_{n+1} C_k A_k$  и  $\Delta A_{n+1} C_1 A_1$  подобны, каковыми они и являются по второму признаку подобия треугольников, поскольку один из их острых углов (при вершине  $A_{n+1}$ ) является общим для обоих рассматриваемых прямоугольных треугольников. Таким образом, корректность вывода (2.26) в версии  $\Delta = 0$  (рис. 2.5) доказана.

Здесь заметим, что реально мгновенная величина  $v_{зер}$  определяется и мгновенной толщиной среза, и степенью износа зерна в рассматриваемый момент времени. Однако использование в общем случае логики доказательств и рассуждений вокруг рассматриваемого подхода к обеспечению устойчивости шлифования эквивалентной (приведенной) среднеинтегральной характеристики

$$\bar{v}_{зер} = \left( \int_0^t v_{зер} d\tau \right) / t, \quad (2.32)$$

где  $t$  – время рабочей жизни зерна, оставляет эту логику без изменений.

В одной из предыдущих работ ([177]) обращалось также внимание на то, что соблюдение равенства (2.26) является условием устойчивой работы шлифовального круга и в условиях поддержания статистически гарантированного зазора между снимаемым припуском и связкой круга

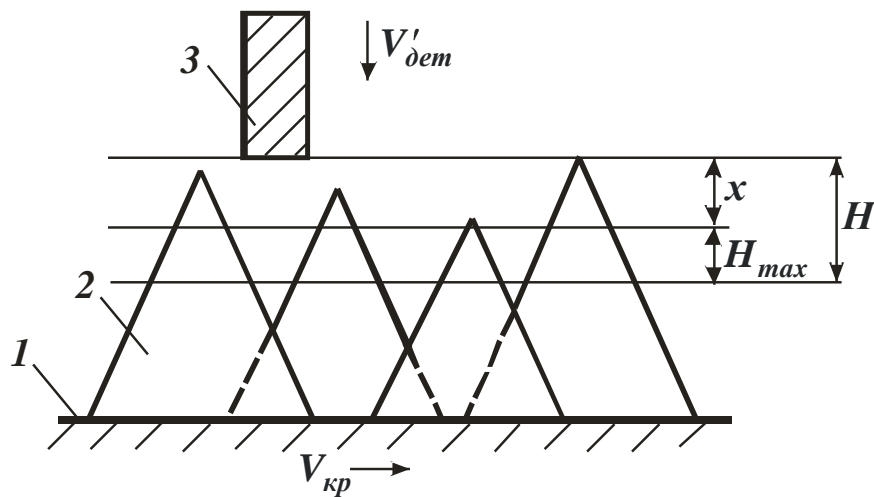
( $\delta H > 0$ , рис. 2.5), но при предварительной правке круга с обеспечением выступания режущих зерен над уровнем связки на величину этого зазора до начала соблюдения регламентом технологического процесса условия (2.26). Такой гарантированный зазор полезен прежде всего с позиций повышения энергоотдачи работы стружкообразования [178] исключением трения поверхности припуска заготовки со связкой круга. Для его обеспечения первому технологическому переходу с заданной производительностью АИШ должна предшествовать предварительная правка круга, формирующая стартовую высоту его рабочего рельефа не ниже этой величины межэлектродного зазора между поверхностями припуска заготовки и связки круга, с последующим соблюдением условия (2.26) в процессе выполнения технологического перехода, однократного (в единичном производстве) или повторяющегося.

Как уже отмечалось выше, практика процессов устойчивого алмазного шлифования требует оперирования системой условий (2.26) и  $\delta H = const$  ( $\delta H \geq 0$ ), рис. 2.4. Понятно, что ограничение  $\delta H$  сверху является статистической характеристикой форморазмерного распределения зерен в содержащей их связующей матрице круга и определяется, с одной стороны, способностью связки к удержанию алмазных зерен на поверхности круга, с другой – режимом нагружения выступающих над поверхностью связки зерен. Если же игнорировать контроль условия  $\delta H = const$ , то возможны ситуации ограниченной устойчивости процесса. Например, форсирование режимов шлифования, предусмотренных операционным регламентом, может привести к росту расхода сверхтвердого абразива, приходящегося на удаление заданного припуска, и, следовательно, сократить плановый ресурс инструмента. Ситуации нарушения регламентной устойчивости процесса могут возникать и без варьирования окружными подачами, т.е. при постоянстве  $v_{кр}$ ,  $v_{заг}$ , но вследствие переменных упругих деформаций в системе СПИД,

например, при шлифовании длинных валов. В этом случае следящий адаптивный контроль должен предусматривать как управление врезным податочным перемещением инструмента (сближением круга и обрабатываемой заготовки в направлении общей нормали к их номинальным поверхностям контакта на участках его повышенной податливости в цикле обработки), так и соответствующее управление электрическими режимами процесса (с использованием, например, принципа дополнительной периодичности импульсного электроэрозионного воздействия [179]).

Полученные результаты [180] и приведенные рекомендации применимы в задачах рационального использования алмазных шлифовальных кругов в комбинированных технологиях, основанных на введении в зону резания электрических разрядов (АИШ).

Для анализа закономерностей формирования параметров устойчивого во времени режущего рельефа алмазного круга воспользуемся теоретическим подходом, предложенным в работах [36, 155].



1 – связка круга; 2 – зерно; 3 – обрабатываемый образец

Рисунок 2.6 – Расчетная схема параметров шлифования

Согласно данному подходу, как показано в подразделе 1.3, параметры режущего рельефа алмазного круга связаны с основными параметрами шлифования следующими зависимостями (рис. 2.6):

$$H = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot b \cdot V'_{дет}}{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} (1 - \eta^2)}} \quad (2.33)$$

$$H_{max} = (1 - \eta) \cdot H, \quad (2.34)$$

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{k^2 \cdot V_{кр}^2 \cdot S_{пред}^3}{81 \cdot tg\gamma \cdot b^2 \cdot V'_{дет}{}^2}}, \quad (2.35)$$

где  $H$  – максимальная глубина внедрения обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга, отсчитывая ее от вершины исходного (неизношенного) максимально выступающего над уровнем связки зерна, м;

$H_{max}$  – максимальная (вероятностная) толщина среза, м;  $\eta = \frac{x}{H}$  – безразмерный

коэффициент, учитывающий степень затупления зерна ( $\eta \rightarrow 0$  – для острого зерна,  $\eta \rightarrow 1$  – для затупленного зерна);  $x$  – величина линейного износа

максимально выступающего над уровнем связки зерна, м;  $b$  – максимальная

высота выступания зерен над уровнем связки круга, м;  $k$  – поверхностная

концентрация зерен круга, шт/м<sup>2</sup>;  $2\gamma$  – угол при вершине конусообразного

режущего зерна;  $S_{пред}$  – предельная площадь поперечного сечения среза

отдельным зерном круга, обусловленная собственно прочностью зерна или

прочностью его удержания в связке круга (в зависимости от типа связки и

механизма износа алмазного круга), м<sup>2</sup>;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с;  $V'_{дет}$  –

скорость подачи обрабатываемого прямолинейного образца, движущегося по

нормали к рабочей поверхности круга, м/с.

Анализируя зависимость (2.35), нетрудно видеть, что стабилизация

рельефа круга произойдет при условии  $V'_{дет} > \frac{k^2 \cdot V_{кр}^2 \cdot S_{пред}^3}{81 \cdot b^2}$ . В противном

случае нагрузка, действующая на отдельное зерно, не достигнет предельного

значения, и разрушения зерен не будет. Зерна будут подвергаться, в основном,

истиранию и микроскалыванию с образованием площадок износа, что вызовет

повышенную теплонапряженность процесса и затупление круга.



Данная закономерность износа будет наблюдаться при неправильном выборе характеристики круга, особенно на финишных операциях, когда зерна прочно удерживаются в связке и обновления режущего рельефа новыми кромками не происходит.

Полученное решение полностью подтверждается практическими рекомендациями по шлифованию, согласно которым на «мягких» режимах резания эффективно применять круги с пониженной прочностью зерен и связкой, работающие в режиме самозатачивания и исключаящие образование значительных площадок износа на режущих зернах.

Анализ зависимости (2.35) также показывает, что при превышении скоростью  $V'_{дет}$  определенного значения потенциальных возможностей режущего рельефа круга будет недостаточно для осуществления полного съема подводимого в зону резания металла и не снятый металл в виде гребешков микронеровностей начнет интенсивно контактировать со связкой, разрушая ее, оголяя зерна и уменьшая таким образом прочность удержания их в связке. Объемное разрушение зерна в данных условиях не произойдет, т.к. нагрузка, действующая на зерно, будет всегда меньше предельной вследствие уменьшения прочности удержания зерна в связке. Доминирующим видом износа алмазного круга будет выпадение зерен из связки, которому обязательно предшествует истирание и поверхностное микроскалывание кромок.

Для более глубокого анализа приведенных зависимостей выразим параметр  $S_{пред}$  через силу резания, действующую на отдельное зерно круга. Будем считать, что объемное разрушение зерна или его выпадение из связки без разрушения (в зависимости от прочности удержания зерна в связке) происходит от действия радиальной составляющей силы резания  $P_{y1}$ , действующей на зерно, так как  $P_{y1} > P_{z1}$ , где  $P_{z1}$  – тангенциальная составляющая силы резания, действующая на зерно.

С учетом сказанного, получим

$$S_{пред} = \frac{P_{z1}}{\sigma} = \frac{P_{y1} \cdot K_{ш}}{\sigma}, \quad (2.36)$$

где  $K_{ш}$  – коэффициент резания при шлифовании,  $K_{ш} = P_{z1} / P_{y1}$ ;  $\sigma$  – условное напряжение резания,  $H/m^2$ .

Как показано в работе [156], между параметрами  $\sigma$  и  $K_{ш}$  существует связь

$$\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{K_{ш}}, \quad (2.37)$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности обрабатываемого материала на сжатие,  $H/m^2$ .

Коэффициент  $K_{ш}$  резания при шлифовании определяется зависимостью [156]

$$K_{ш} = \sqrt{\frac{4 \cdot \sigma_{сж}}{4 \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV} \cdot (1 - \eta)}, \quad (2.38)$$

где  $HV$  – твердость обрабатываемого материала (по Виккерсу),  $H/m^2$ .

Подставляя зависимости (2.37) и (2.38) в зависимость (2.4), имеем

$$S_{пред} = \frac{P_{y1}}{2 \cdot \sigma_{сж}} \cdot (1 - \eta), \quad (2.39)$$

Соответственно параметры  $H$ ,  $H_{max}$  и  $\eta$ , описываемые зависимостями (2.33)-(2.35), примут вид [181]:

$$\eta = 1 - \frac{9 \cdot b \cdot V'_{дет}}{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}} \cdot \left( \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{P_{y1}} \right)^{1,5}, \quad (2.40)$$

$$H = \left( \frac{P_{y1}}{2 \cdot \sigma_{сж}} \right)^{0,5}, \quad (2.41)$$

$$H_{max} = \frac{9 \cdot b \cdot V'_{дет}}{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}} \cdot \left( \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{P_{y1}} \right). \quad (2.42)$$

Разрешим зависимость (2.40) относительно скорости  $V'_{дет}$ :

$$V'_{дет} = \frac{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta)}{9 \cdot b} \cdot \left( \frac{P_{y1}}{2 \cdot \sigma_{сж}} \right)^{1,5}. \quad (2.43)$$

Учитывая полученную зависимость, можно определить

производительность обработки  $Q = V'_{дет} \cdot F$  (где  $F$  – площадь поперечного сечения обрабатываемого образца,  $m^2$ ):

$$Q = \frac{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta) \cdot F}{9 \cdot b} \cdot \left( \frac{P_{y1}}{2 \cdot \sigma_{сж}} \right)^{1,5}. \quad (2.44)$$

Увеличить скорость детали  $V'_{дет}$  и соответственно производительность обработки  $Q$  можно главным образом за счет уменьшения безразмерного коэффициента  $\eta \rightarrow 0$ . При условии  $\eta \rightarrow 1$  скорость детали  $V'_{дет} \rightarrow 0$  ( $Q \rightarrow 0$ ). Следовательно, для осуществления высокопроизводительного шлифования необходимо поддерживать на рабочей поверхности круга развитый режущий рельеф (характеризующийся высокой остротой режущих зерен), своевременно удаляя затупившиеся режущие зерна.

Добиться увеличения скорости детали  $V'_{дет}$  и производительности обработки  $Q$  можно также за счет увеличения радиальной составляющей силы резания  $P_{y1}$ , действующей на отдельное зерно круга.

Как отмечалось выше, предельное значение  $P_{y1}$  в зависимости от механизма износа алмазного круга может быть обусловлено собственно прочностью зерен или прочностью удержания их в связке круга. Поэтому увеличить  $P_{y1}$  можно увеличением прочности зерен (если в механизме износа круга преобладает объемное разрушение зерен) или прочностью удержания их в связке круга (если в механизме износа круга преобладает преждевременное выпадение из связки малоизношенных зерен, не претерпевших объемного разрушения).

Зависимость (2.40) устанавливает связь между безразмерным коэффициентом  $\eta$  и радиальной составляющей силы резания, действующей на отдельное зерно  $P_{y1}$ . С увеличением безразмерного коэффициента  $\eta$  (т.е. выполняя условие  $\eta \rightarrow 1$ ) параметр  $P_{y1}$  неограниченно увеличивается.

Следовательно, по мере затупления зерна (т.е. выполняя условие  $\eta \rightarrow 1$ ) параметр  $P_{y1}$  может достичь одного из двух предельных значений: значения

силы, удерживающей зерно в связке, или значения силы, при которой произойдет раздавливание зерна (объемное разрушение). В этом случае произойдет стабилизация режущего рельефа круга в процессе шлифования.

Принимая в зависимостях (2.40) и (2.42) параметр  $P_{y1}$  постоянным, проанализируем изменение параметров  $\eta$ ,  $H$  и  $H_{max}$ .

Параметр  $H$  не зависит от параметров режима шлифования, а определяется прочностью зерна (связки) и обрабатываемого материала. Чем выше прочность зерна и ниже прочность обрабатываемого материала, тем больше параметр  $H$ . Увеличение параметра  $H$  предполагает увеличение высоты выступления зерна над уровнем связки круга  $b$  и выполнение условия  $b \geq H$ .

В отличие от параметра  $H$ , параметр  $H_{max}$  и безразмерный коэффициент  $\eta$  зависят от режимов шлифования. С увеличением скорости детали  $V'_{дет}$  (и соответственно производительности обработки  $Q$ ) параметр  $H_{max}$  увеличивается, а безразмерный коэффициент  $\eta$  уменьшается.

При определенной скорости детали  $V'_{дет}$  безразмерный коэффициент  $\eta$  примет значение  $\eta=0$ . Это значение будет определять максимально возможную (предельную) производительность обработки  $Q$ . Величина линейного износа зерна  $x$  при этом будет равна нулю.

Зависимости (2.40)-(2.42) можно представить в виде:

$$\eta = 1 - H_0^3 \cdot \left( \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{P_{y1}} \right)^{1,5}, \quad (2.45)$$

$$H_{max} = H_0^3 \cdot \left( \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{P_{y1}} \right), \quad (2.46)$$

где  $H_0 = \sqrt[3]{\frac{9 \cdot b \cdot V'_{дет}}{tg \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}}$ .

Применительно к круглому наружному (плоскому) шлифованию, преобразуем зависимости (2.45) и (2.46) с учетом известного соотношения [36]:

$$V'_{дет} = V_{дет} \cdot \sqrt{2 \cdot t \cdot \rho} \text{ и соотношений [182]: } b = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X}; k = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}, \text{ где}$$

$(1 - \varepsilon)$  – коэффициент, учитывающий степень выступания зерен над уровнем связки;  $V_{дет}$  – скорость детали, м/с.

Тогда

$$\eta = 1 - \frac{600 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{2 \cdot t \cdot \rho}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{кр}} \cdot \left( \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{P_{y1}} \right)^{1,5}, \quad (2.47)$$

$$H_{max} = \frac{600 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{2 \cdot t \cdot \rho}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{кр}} \cdot \left( \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{P_{y1}} \right), \quad (2.48)$$

где  $\bar{X}$  – зернистость круга, м;  $m$  – объемная концентрация зерен круга;  $t$  – глубина шлифования, м;  $\rho = \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}$ ;  $R_{кр}$ ,  $R_{дет}$  – соответственно радиусы круга и детали, м.

Параметр  $H$ , определяемый зависимостью (2.33), применительно к круглому наружному шлифованию с учетом несложных преобразований, выразится:

$$H = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta^2)}}. \quad (2.49)$$

Как следует из полученной зависимости, параметр  $H$  тем больше, чем больше скорость детали  $V_{дет}$ , глубина шлифования  $t$ , зернистость круга  $\bar{X}$ , безразмерный коэффициент  $\eta$  и чем меньше объемная концентрация зерен круга  $m$  и скорость круга  $V_{кр}$ .

2.3. Взаимосвязь параметров режущего рельефа алмазного круга с шероховатостью и производительностью обработки при устойчивом шлифовании

Определим параметр шероховатости обработки  $R_{max}$  с учетом условия

стабилизации режущего рельефа круга. Для этого воспользуемся условием, приведенным в работе [183]:

$$R_{max} = H_{max} = t, \quad (2.50)$$

где параметр  $H_{max}$  определяется зависимостью (2.34).

После соответствующих преобразований (2.50) имеем

$$R_{max} = 5 \sqrt[5]{\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2} \cdot \frac{18 \cdot 10^4 \cdot \pi^2 \cdot \bar{X}^6 \cdot V_{дет}^2 \cdot \rho}{tg^2 \gamma \cdot m^2 \cdot V_{кр}^2}}. \quad (2.51)$$

В зависимость (2.51) входит безразмерная величина  $\sqrt[5]{\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2}}$ , которая определяет степень износа (сглаженность) режущего рельефа алмазного круга. С увеличением безразмерного коэффициента  $\eta$  параметр шероховатости обработки  $R_{max}$  уменьшается.

Подставим в зависимость (2.51) зависимость (2.47), пренебрегая множителем  $(1 + \eta) \approx 1$ :

$$R_{max} = 5 \sqrt[5]{\left[ \frac{600 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho}}{tg \gamma \cdot m \cdot V_{кр}} \cdot \left( \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{P_{y1}} \right) \right]^6} \cdot t^2. \quad (2.52)$$

Как видим, при условии стабилизации режущего рельефа алмазного круга влияние параметров  $\bar{X}$ ,  $m$ ,  $V_{дет}$ ,  $V_{кр}$ ,  $\rho$  на параметр шероховатости обработки  $R_{max}$  усиливается. Имеет место увеличение  $R_{max}$  с увеличением глубины шлифования  $t$ . Следовательно, изменение параметров режущего рельефа круга ведет к существенному изменению шероховатости обработанной поверхности.

Рассмотрим влияние механизма износа круга на параметры его режущего рельефа.

Приведенные выше аналитические зависимости справедливы для условий:  $b \geq H$  и  $P_{y1} = P$ , где  $P$  – сила, при которой происходит разрушение (раздавливание) режущего зерна. Если из расчетов вытекает, что  $H > b$ , то предельное значение радиальной составляющей силы резания  $P_{y1}$ , действующей

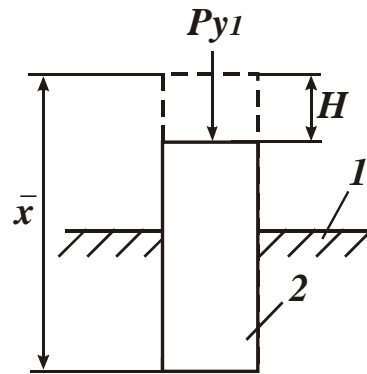
на отдельное зерно, будет меньше  $P$  и равно силе, удерживающей зерно в связке. В этом случае объемное разрушение зерен не произойдет, зерна будут выпадать из связки под действием силы  $P_{y1} < P$ .

Рассмотрим условие устойчивости зерна в связке от действия радиальной составляющей силы резания  $P_{y1}$ , действующей на отдельное зерно.

Радиальная составляющая силы резания  $P_{y1}$ , действующая на отдельное зерно, условно определяется (рис.2.7)

$$P_{y1} = a \cdot (\bar{X} - H), \quad (2.53)$$

где  $a$  – размерный коэффициент, зависящий от прочности связки круга (чем прочнее связка, тем больше коэффициент  $a$ ).



1 – связка круга; 2 – режущее зерно

Рис. 2.7. Расчетная схема устойчивости зерна в связке

Из зависимости (2.53) следует, что с увеличением параметра  $H=b$  (вследствие уменьшения глубины залегания зерна в связке круга) радиальная составляющая силы резания  $P_{y1}$ , действующая на отдельное зерно, уменьшается.

Подставим зависимость (2.53) в зависимость (2.41):

$$H^2 + \frac{a}{2 \cdot \sigma_{сж}} \cdot H - \frac{a \cdot \bar{X}}{2 \cdot \sigma_{сж}} = 0. \quad (2.54)$$

После несложных преобразований приходим к квадратному уравнению относительно неизвестной величины  $H$ .

Решение уравнения имеет вид:

$$H = \frac{\bar{X}}{\left( \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot \bar{X}}{a}} \right)}. \quad (2.55)$$

Знаменатель зависимости (2.55) больше единицы, поэтому  $H < \bar{X}$ . Чем больше предел прочности на сжатие обрабатываемого материала  $\sigma_{сж}$  и меньше коэффициент  $a$ , тем меньше величина  $H$ . Следовательно, с уменьшением прочности удержания зерна в связке величина  $H = b$  уменьшается.

Подставим зависимость (2.55) в зависимость (2.53). После преобразований, имеем

$$P_{y1} = \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot \bar{X}}{\left( \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot \bar{X}}{a}} \right)}. \quad (2.56)$$

Нетрудно видеть, что с увеличением параметров  $\sigma_{сж}$ ,  $\bar{X}$  и  $a$  радиальная составляющая силы резания  $P_{y1}$ , действующая на отдельное зерно, увеличивается.

Из зависимостей (2.40) и (2.42) следует, что с увеличением  $P_{y1}$  безразмерный коэффициент  $\eta$  увеличивается, а максимальная (вероятностная) толщина среза  $H_{max}$  уменьшается. Следовательно, с увеличением прочности удержания зерна в связке (с увеличением коэффициента  $a$ ) максимальная (вероятностная) толщина среза  $H_{max}$  уменьшается, а безразмерный коэффициент  $\eta$  увеличивается (режущий рельеф круга становится более сглаженным).

Как видим, все основные параметры шлифования (в случае, когда в механизме износа круга преобладает выпадение зерен из связки без их объемного разрушения) определяются прочностными свойствами связки круга и обрабатываемого материала, а также зернистостью круга  $\bar{X}$ . Параметры режима шлифования влияния не оказывают.

Выразим в зависимости (2.55) параметр  $H$  зависимостью (2.33) и разрешим полученное выражение относительно скорости детали  $V'_{дет}$ :



$$V'_{дет} = \frac{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot (1-\eta)}{9 \cdot b} \cdot \left( \frac{\bar{X}}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2 \cdot \sigma_{сжс} \cdot \bar{X}}{a}}} \right)^3. \quad (2.57)$$

Определим производительность обработки  $Q = V'_{дет} \cdot F$ . Для этого преобразуем зависимость (2.57) с учетом известных, приведенных выше, соотношений [182]:  $b = (1-\varepsilon) \cdot \bar{X}$ ;  $k = \frac{3 \cdot m \cdot (1-\varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}$ , где  $(1-\varepsilon)$  - коэффициент, определяющий степень выступления зерен над уровнем связки:

$$Q = \frac{tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр} \cdot (1-\eta) \cdot F}{600 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2 \cdot \sigma_{сжс} \cdot \bar{X}}{a}}} \right)^3. \quad (2.58)$$

Как следует из зависимости (2.58), увеличить производительность обработки  $Q$  можно увеличением параметров  $m$ ,  $V_{кр}$ ,  $F$  и уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta$ .

Данное решение получено для случая  $H=b$ . В реальных условиях шлифования параметр  $H$  всегда меньше максимальной высоты выступления режущих зерен над уровнем связки круга  $b$  на величину, равную высоте межзеренного пространства круга  $\Delta$ , занимаемого образующимися стружками и другими продуктами обработки.

Для того чтобы учесть указанную высоту, необходимо в зависимости (2.23) рассматривать вместо величины  $\bar{X}$  величину  $(\bar{X} - \Delta)$ . Очевидно, это приведет к уменьшению параметра  $H$ . Однако, не столь значительно, т.к.  $(\bar{X} \gg \Delta)$ . Поэтому можно считать, что параметр  $H$ , скорость детали  $V'_{дет}$  и соответственно производительность обработки  $Q$  обусловлены устойчивостью зерен в связке, определяемой прочностными свойствами связки круга и обрабатываемого материала.

Следует отметить, что данный вывод справедлив для случая, когда в механизме износа круга преобладает выпадение зерен из связки без их объемного разрушения. В случае, когда в механизме износа круга преобладает объемное разрушение зерен и их последующее выпадение из связки, параметры  $\alpha$  и  $\beta$  будут определяться зависимостями (2.41) и (2.42). В этих зависимостях радиальную составляющую силы резания  $P_{y1}$ , действующую на максимально выступающее из связки зерно, необходимо рассматривать равной предельной силе, при которой происходит объемное разрушение (раздавливание) алмазного зерна.

## ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

### 3.1. Оценка влияния кинематического и физического факторов на условия формирования показателей обработки при алмазном шлифовании

Из всего многообразия процессов механической обработки материалов процесс шлифования следует рассматривать наиболее сложным и менее изученным. Сложная кинематика формообразования поверхностей и съёма материала, неопределённость количества одновременно участвующих в резании зёрен в связи с вероятностным характером участия зёрен в резании, значительное влияние износа зёрен на показатели обработки – всё это затрудняет изучение процесса шлифования и выработку эффективных путей его интенсификации. Раздельно учесть кинематический и физический факторы шлифования в полном объёме в настоящее время не представляется возможным. Однако в первом приближении задача может быть решена. Решение основано на возможности достаточно точного математического описания кинематики шлифования и всех параметров обработки, обусловленных кинематическим фактором, например, шероховатости обработанной поверхности. Тогда по разности экспериментальных и расчётных значений можно судить о физическом факторе процесса шлифования.

Данный подход реализован в работах [36, 155-157]. Параметр шероховатости обработки  $R_a$  аналитически описывается зависимостью (2.51).

Зависимость (2.51) включает условно две группы параметров. Параметры  $\bar{X}$ ,  $m$ ,  $\gamma$ ,  $V_{дет}$ ,  $V_{кр}$ ,  $\rho$  определяют кинематику шлифования, а безразмерный коэффициент  $\eta$  - физику шлифования в связи с износом зёрен.

При условии  $\eta=0$  формирование шероховатости поверхности происходит под действием кинематического фактора (шлифование острыми зёрнами после

правки круга). По мере затупления зёрен безразмерный коэффициент  $\eta$  увеличивается и параметр шероховатости обработки  $R_a$  уменьшается. Причём, влияние безразмерного коэффициента  $\eta$  на параметр  $R_a$  более значительно, чем других факторов влияния, входящих в зависимость (2.51). Это указывает на доминирующую роль состояния режущего рельефа круга (степени износа круга, т.е. физического фактора) в формировании шероховатости обработки.

Зависимость (2.51) справедлива для круглого шлифования с долевой продольной подачей, равной единице,  $S_\delta=1$ . Под параметром  $S_\delta$  следует понимать отношение продольной подачи (в метрах на оборот детали) к высоте круга (в метрах). Зависимость (2.51) является частным случаем (при  $S_\delta=1$ ) более общей зависимости [36]:

$$R_a = 2 \cdot 5 \sqrt[5]{\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2} \cdot \frac{\pi^2 \cdot \bar{X}^6 \cdot V_{\text{дет}}^2 \cdot S_\delta^2 \cdot \rho}{\text{tg}^2 \gamma \cdot m^2 \cdot V_{\text{кр}}^2}}. \quad (3.1)$$

Из зависимости (3.1) следует, что для уменьшения шероховатости обработки параметр  $S_\delta$  необходимо уменьшать. На этом принципе построены все процессы окончательного (чистового) шлифования.

Параметр  $S_\delta$  определяется из кинематического соотношения:

$$S_\delta = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{\text{дет}}}{B} \cdot \frac{S_{\text{пр}}}{V_{\text{дет}}}, \quad (3.2)$$

где  $B$  – высота круга, м;  $S_{\text{пр}}$  – скорость продольной подачи, м/с.

С учётом зависимости (3.2) зависимость (3.1) принимает вид:

$$R_a = 2 \cdot 5 \sqrt[5]{\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2} \cdot \frac{4 \cdot \pi^4 \cdot \bar{X}^6 \cdot R_{\text{дет}}^2 \cdot S_{\text{пр}}^2 \cdot \rho}{\text{tg}^2 \gamma \cdot m^2 \cdot V_{\text{кр}}^2 \cdot B^2}}. \quad (3.3)$$

Скорость детали  $V_{\text{дет}}$  не входит в данную зависимость. Вместо неё в зависимость (3.3) входит скорость продольной подачи  $S_{\text{пр}}$ , с увеличением

которой параметр  $R_a$  увеличивается. Кроме параметра  $S_{np}$  в зависимость (3.3) вошёл новый параметр  $B$ , с увеличением которого шероховатость обработки уменьшается.

Следовательно, применение кругов увеличенной высоты создаёт резервы уменьшения параметра  $R_a$ . Следует обратить внимание на то, что зависимость (3.3) не содержит глубины шлифования  $t$ .

Для отдельного учёта кинематической и физической составляющих в формировании шероховатости обработанной поверхности, согласно зависимости (3.3), используем экспериментальные данные по шероховатости обработки, полученные при круглом наружном алмазно-искровом шлифовании кругом 1A1 200x10x3 AC6 400/315 M2-01 4 деталей из немагнитной стали Ф2.

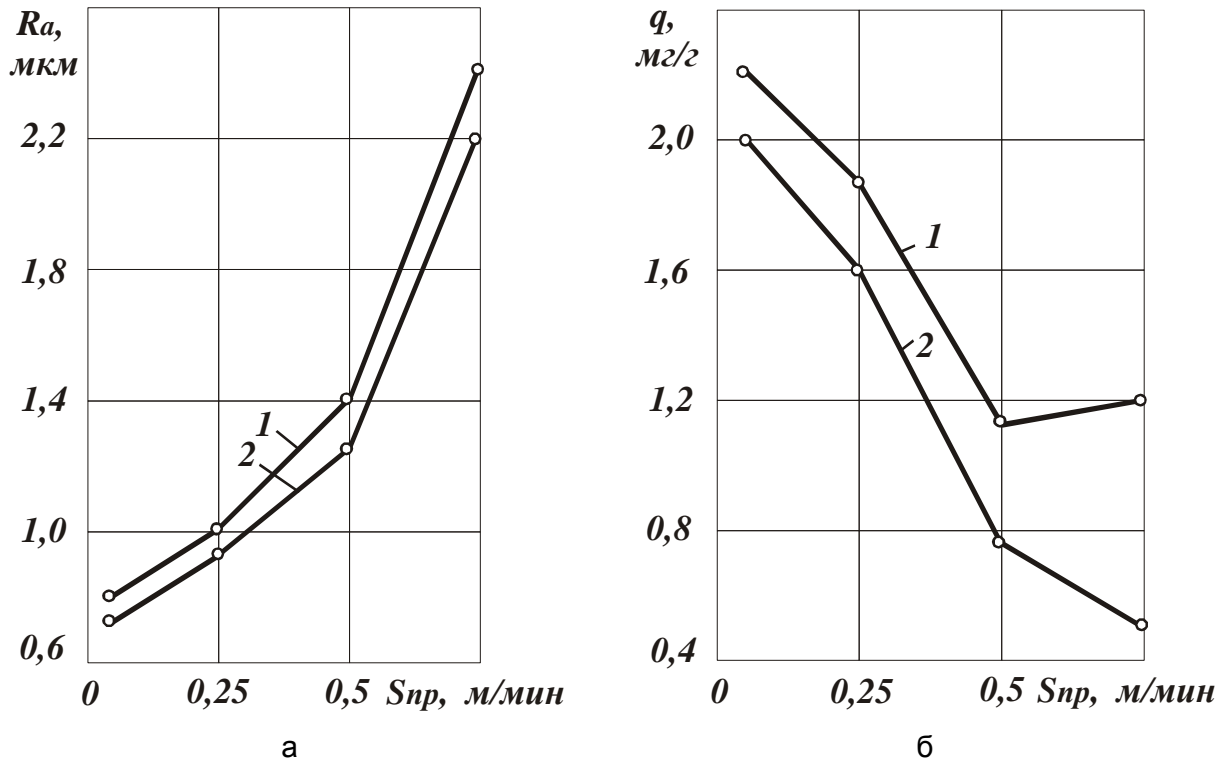
Как следует из рисунка 3.1, *a*, с увеличением скорости продольной подачи  $S_{np}$  параметр шероховатости обработки  $R_a$  непрерывно увеличивается.

При увеличении  $S_{np}$  от 0,1 до 0,75 м/мин, т.е. в 7,5 раз, параметр  $R_a$  увеличивается от 0,75 до 2,4 мкм, т.е. в 3,2 раза. Согласно зависимости (3.3), при увеличении  $S_{np}$  в 7,5 раз параметр шероховатости  $R_a$  увеличивается в 2,2 раза. Наблюдаемое несоответствие экспериментального и расчётного значений  $R_a$  может быть связано с тем, что с увеличением  $S_{np}$  уменьшается безразмерный коэффициент  $\eta$ , в результате чего параметр  $R_a$  увеличивается.

Из этого следует, что увеличение параметра  $R_a$ , обусловлено, с одной стороны, кинематическим фактором – увеличением  $S_{np}$  в зависимости (3.3), с другой стороны – физическим фактором (уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta$ ).

Расчёты по зависимости (3.3) для исходных данных:  $\bar{X}=0,4$  мм;  $m=100$ ;  $B=10$  мм;  $R_{кр}=100$  мм;  $R_{дет}=20$  мм;  $V_{кр}=30$  м/с;  $\gamma=45^\circ$  показывают, что при  $S_{np}=0,1$  м/мин расчётное значение  $R_a$  равно экспериментальному значению

$R_a=0,75$  мкм при условии  $\eta=0,5$ , а для  $S_{np}=0,75$  м/мин – при условии  $\eta=0,3$ .



1 – АИШ; 2 – обычное алмазное шлифование

$V_{кр} = 30$  м/с;  $V_{дет} = 35$  м/мин;  $t = 10$  мкм/ход

Рисунок 3.1 – Зависимости параметра шероховатости  $R_a$  (а)

и удельного расхода алмаза  $q$  (б) от скорости продольной подачи  $S_{np}$

Следовательно, с увеличением продольной подачи  $S_{np}$  безразмерный коэффициент  $\eta$  уменьшается. Тот факт, что для данных условий обработки безразмерный коэффициент  $\eta$  принимает значения меньше единицы, свидетельствует о достоверности предложенной расчётной зависимости (3.3).

При обычном алмазном шлифовании (кривая 2 на рис. 3.1, а) параметр шероховатости обработки  $R_a$  несколько меньше, чем при АИШ. Это связано с увеличением безразмерного коэффициента  $\eta$ . Следовательно, подвод в зону резания электрического тока позволяет уменьшить величину износа зёрен круга

(уменьшить безразмерный коэффициент  $\eta$ ), что приводит к повышению режущей способности алмазного круга на металлической связке М2-01 и к некоторому увеличению параметра шероховатости обработки  $R_a$ .

В табл. 3.1 приведены значения поправочного коэффициента  $k = 5 \sqrt{\frac{(1-\eta)^4}{(1+\eta)^2}}$ , входящего в зависимость (3.3). С увеличением безразмерного

коэффициента  $\eta$  коэффициент  $k$  уменьшается. Это указывает на возможность значительного уменьшения параметра шероховатости обработки  $R_a$  за счет создания на зернах площадок, особенно в диапазоне  $\eta > 0,8$ .

Таблица 3.1. Расчётные значения коэффициента  $k$

$\eta$	0	0,3	0,5	0,8	0,9	0,95
$k$	1,0	0,64	0,48	0,41	0,12	0,07

Как видим, при алмазном электроэрозионном шлифовании (АИШ) при изменении продольной подачи  $S_{np}$  в 7,5 раза безразмерный коэффициент  $\eta$  изменился незначительно: от 0,5 до 0,3, т.е. приблизительно в 1,6 раз.

При увеличении продольной подачи  $S_{np}$  в 7,5 раз (от 0,1 до 0,75 м/мин) удельный расход алмаза  $q$  первоначально уменьшается от 2,2 мг/г до значения 1,2 мг/г, затем в диапазоне  $S_{np}=0,5...0,75$  м/мин остаётся почти одинаковым, рис. 3.1, б.

С увеличением продольной подачи  $S_{np}$  в 7,5 раз производительность обработки  $Q$  увеличивается примерно во столько же раз, а безразмерный коэффициент  $\eta$  (как показано выше) уменьшается от 0,5 до 0,3.

Для анализа полученных экспериментальным путем закономерностей установим аналитическую зависимость, увязывающую скорость износа связки

круга  $V_{св}$  с удельным расходом алмаза  $q$ .

Предположим, что за определенное время шлифования  $\tau$ , с, произошел полный износ алмазного слоя круга толщиной  $S$ , м. Масса алмазного порошка, находящегося в этом алмазном слое круга, кг, равна  $m_a = \rho_a \cdot V_a$ , где  $\rho_a$  – плотность алмаза, кг/м<sup>3</sup>;  $V_a$  – объем алмазного слоя круга, м<sup>3</sup>, занимаемый алмазным порошком

$$V_a = \pi \cdot D_{кр} \cdot B \cdot S \cdot \alpha, \quad (3.4)$$

$D_{кр}$ ,  $B$  – соответственно диаметр и ширина алмазного круга, м;  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий плотность связки в зависимости от концентрации алмазных зёрен в круге [55].

За это же время  $\tau$  с обрабатываемого изделия будет снят материал массой, кг,  $m_m = \rho_m \cdot V_m$ , где  $\rho_m$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $V_m$  – объем снятого материала, м<sup>3</sup>,

$$V_m = Q \cdot \tau, \quad (3.5)$$

$Q$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с.

Удельный расход алмаза  $q$  с учетом зависимостей (3.4) и (3.5) определится

$$q = \frac{m_a}{m_m} = \frac{\rho_a}{\rho_m} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кр} \cdot B \cdot \alpha}{Q} \cdot V_{св}. \quad (3.6)$$

В данной зависимости принято, что отношение  $\frac{S}{\tau}$  равно скорости износа связки круга  $V_{св}$ , которая определяется зависимостью (2.26). Тогда, подставляя зависимость (2.26) в зависимость (3.6), имеем

$$q = \frac{\rho_a}{\rho_m} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кр} \cdot B \cdot \alpha}{Q} \cdot \frac{V_{зер}}{\eta}. \quad (3.7)$$

Аналогичный результат вытекает из полученной в работе [158] другим методом зависимости для определения удельного расхода алмаза  $q$



$$q = \frac{10^{-3} \cdot \rho_a \cdot \alpha \cdot \Delta_i \cdot V_{кр}}{\rho_m \cdot V_{дет} \cdot t \cdot \eta}, \quad (3.8)$$

где  $\Delta_i$  – линейный износ зерна за одно касание с обрабатываемым материалом, м;  $V_{кр}$ ,  $V_{дет}$  – соответственно скорости круга и детали, м/с;  $t$  – глубина шлифования, м.

После определенных преобразований зависимость (3.8) принимает вид

$$q = \frac{M}{Q} \cdot \frac{\sqrt{1-\eta}}{\eta^3}, \quad (3.9)$$

где

$$M = \frac{2 \cdot \rho_a \cdot \alpha \cdot V_{кр} \cdot B}{\rho_m \cdot c} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{сж} \cdot HV}{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma}}, \quad (3.10)$$

$\sigma_{сж}$ ,  $HV$  – соответственно предел прочности на сжатие и твёрдость (по Виккерсу) обрабатываемого материала,  $H/m^2$ ;  $\gamma$  – половина угла при вершине конусообразного режущего зерна;  $c$  – коэффициент, характеризующий износостойкость алмазного зерна круга,  $H/m^3$ .

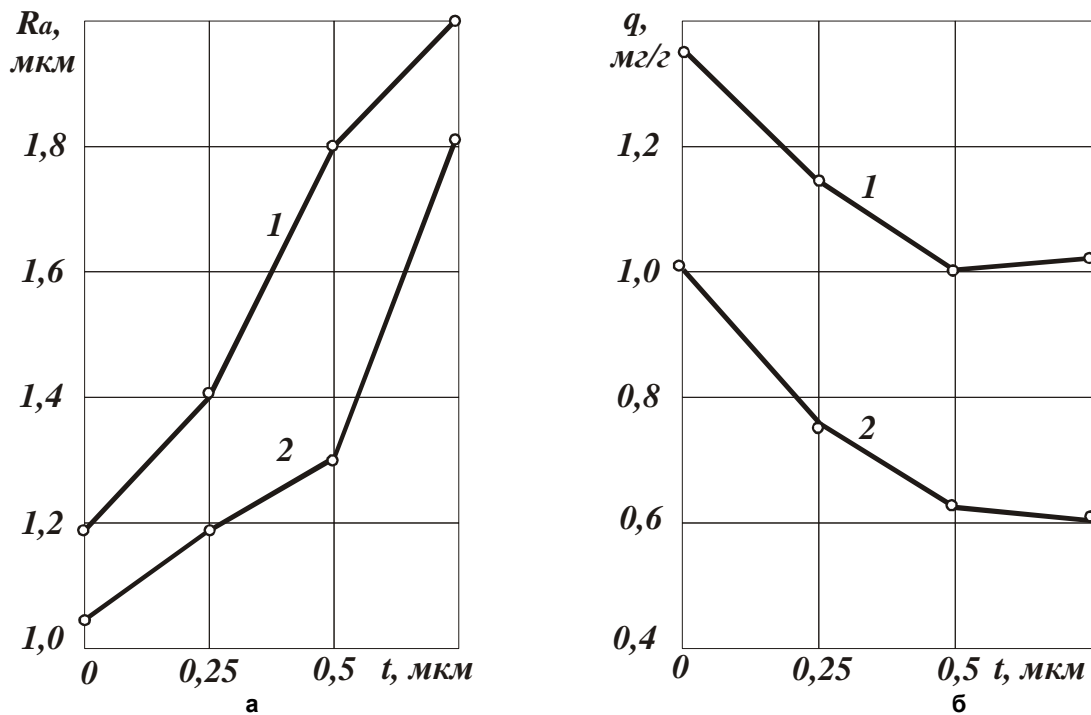
Тогда, исходя из зависимости (3.9), с увеличением продольной подачи  $S_{np}$  удельный расход алмаза  $q$  должен несколько уменьшиться, т.к. влияние параметра  $Q$  превалирует над влиянием безразмерного коэффициента  $\eta$ .

Следовательно, теоретические результаты согласуются с экспериментальными. Это указывает на то, что безразмерный коэффициент  $\eta$  влияет на изменение технологических показателей  $R_a$  и  $q$ , однако в диапазоне  $S_{np}=0,1\dots0,5$  м/мин не столь существенно, т.е. роль физического фактора в формировании технологических показателей обработки меньше, чем кинематического.

При  $S_{np} > 0,5$  м/мин роль физического фактора усиливается, т.к. наблюдается увеличение удельного расхода алмаза  $q$ . Согласно зависимости (2.49), это связано с тем, что с увеличением продольной подачи  $S_{np}$  изменение

функции  $\sqrt{1-\eta}/\eta^3$  более значительно, чем функции  $1/Q$ . В результате удельный расход алмаза  $q$  увеличивается.

Аналогичным образом проведём анализ влияния глубины шлифования на параметр шероховатости обработки  $R_a$  и удельный расход алмаза  $q$ , рис. 3.2.



1 – АИШ; 2 – обычное алмазное шлифование

$V_{кр} = 30$  м/с;  $V_{дет} = 35$  м/мин;  $S_{пр} = 0,5$  м/мин

Рис. 3.2. Зависимости параметра шероховатости  $R_a$  (а)

и удельного расхода алмаза  $q$  (б) от глубины шлифования  $t$

Исходя из зависимости (3.3), увеличение параметра шероховатости обработки  $R_a$  с увеличением глубины шлифования  $t$  может быть связано лишь с уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta$ .

Следовательно, с увеличением глубины шлифования  $t$  безразмерный коэффициент  $\eta$  уменьшается, что приводит в соответствие теорию и практику.

Уменьшение безразмерного коэффициента  $\eta$  должно привести к

увеличению удельного расхода алмаза  $q$ . Однако, исходя из рисунка 3.2, б, с увеличением глубины шлифования  $t$  первоначально удельный расход алмаза  $q$  уменьшается и лишь при  $t > 15$  мкм начинает увеличиваться. Это указывает на то, что при изменении глубины шлифования  $t$  в диапазоне 5...15 мкм в расчетах по зависимости (3.9) преобладает влияние параметра  $Q$ , который увеличивается почти пропорционально увеличению глубины шлифования  $t$  и приводит к уменьшению удельного расхода алмаза  $q$ .

Начиная с глубины шлифования, равной  $t = 15$  мкм, в зависимости (3.9) преобладает влияние безразмерного коэффициента  $\eta$ , который уменьшается с увеличением  $t$  и приводит к увеличению удельного расхода алмаза  $q$ , т.е. при  $t < 15$  мкм преобладает кинематический фактор, а при  $t > 15$  мкм – физический фактор, связанный с износом зёрен и уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta$ .

При  $t > 15$  мкм величина линейного износа зерна до момента его разрушения и выпадения из связки круга уменьшается, что снижает ресурс работы зерна в круге и повышает удельный расход алмаза.

### 3.2. Установление и следствия взаимосвязи величины линейного износа зерна с радиусом округления его вершины и максимальной толщиной среза

Одним из общеизвестных неотъемлемых условий осуществимости процесса шлифования как процесса массового микрорезания является достаточность глубины внедрения абразивных зерен рабочей поверхности круга в обрабатываемый материал. В классической формулировке проф. И. В. Крагельского [184] глубина внедрения абразивной частицы в материал  $a_z$  достаточна для его микрорезания, если составляет примерно 0,2-0,3 радиуса  $R$  контактирующего выступа соответствующей конфигурации.

В интересах повышения вероятности практической воспроизводимости результатов аналитических приближений, полученных с использованием

моделей процесса шлифования, пороговое значение  $a_z/R$  может быть несколько завышено, как это сделано, например, в работе [125], где оно поднято до величины  $(a_z/R) = 0,4$ . К тому же, такое решение соответствует диапазону  $(a_z/R) = 0,1 \dots 0,5$ , приводимому М. Ф. Семко и др. [46] как обобщение исследований физических особенностей алмазного микрорезания [97, 185].

Проведем теоретический анализ безразмерного коэффициента  $\eta$  с учетом известного соотношения  $a_z/R$ , определяющего условия стружкообразования при микрорезании отдельным зерном (где  $a_z = H_{max}$  – толщина среза,  $m$ ;  $R$  – радиус округления вершины зерна,  $m$ ). Для этого представим безразмерный коэффициент  $\eta$  в виде:

$$\eta = \frac{x}{H} = \frac{x}{x + H_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{H_{max}}{x}}. \quad (3.11)$$

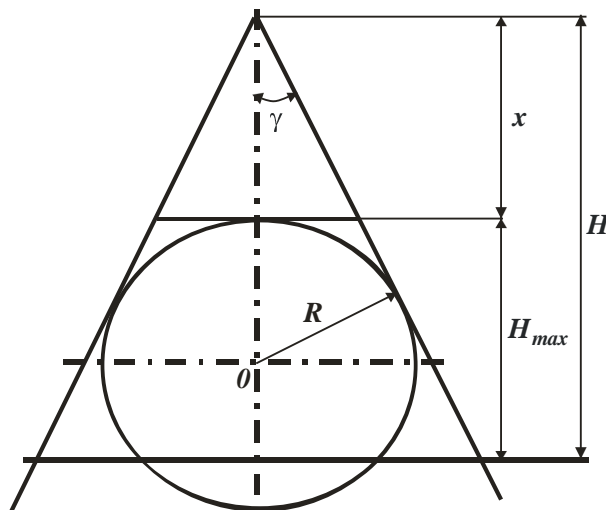


Рис. 3.3. Расчетная схема

Используя расчетную схему, приведенную на рисунке 3.3, получим тригонометрическое соотношение:

$$\frac{R}{x + R} = \sin \gamma,$$

откуда

$$x = R \cdot \left( \frac{1}{\sin \gamma} - 1 \right). \quad (3.12)$$

Подставляя зависимость (3.12) в зависимость (3.11), имеем

$$\eta = \frac{1}{1 + \left( \frac{\sin \gamma}{1 - \sin \gamma} \right) \cdot \frac{a_z}{R}}. \quad (3.13)$$

Как следует из зависимости (3.13), с увеличением соотношения  $a_z / R$  безразмерный коэффициент  $\eta$  уменьшается.

Исходя из зависимости (3.13), выполнение условия  $(a_z / R) > 0,04$  соответствует изменению безразмерного коэффициента  $\eta$  в пределах 0,13...0,91, табл. 3.2. Чем больше соотношение  $a_z / R$ , т.е. чем интенсивнее процесс стружкообразования при шлифовании, тем меньше значения безразмерного коэффициента  $\eta$  и больше производительность обработки  $Q$ .

Наибольшему значению  $\eta=0,91$  (при  $\gamma=45^\circ$ ) соответствует наименьшее значение  $(a_z / R) = 0,04$ . Такое же значение  $\eta$  получено экспериментально при шлифовании алмазными зернами с искусственно созданными на них площадками. При этом, по данным Дитиненко С.А. [153, 186-188], удалось уменьшить шероховатость обработки до значения  $R_a = 0,1$  мкм. Начальное значение параметра  $R_a$  (при  $\eta=0$ ) составляло 2,0 мкм, т.е. шероховатость обработки уменьшилась более чем в 10 раз. Это согласуется с теоретическими данными, приведенными в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Расчетные значения  $\eta$

$a_z / R$ $\gamma$ , град	0,04	0,01	0,2	0,3	0,5	1,0
45	0,91	0,805	0,67	0,58	0,45	0,29
60	0,78	0,6	0,43	0,33	0,23	0,13

Установленная связь безразмерного коэффициента  $\eta$  и соотношения  $a_z / R$  позволяет оценить возможности осуществления процесса микрорезания при шлифовании для конкретных значений  $\eta$ , полученных, например, исходя из минимума технологической себестоимости обработки или из условия обеспечения заданной шероховатости и т. д.

Иными словами, установленные по какому-либо критерию оптимальные значения безразмерного коэффициента  $\eta$  необходимо проверить с точки зрения выполнения условия  $(a_z / R) > 0,04$ . Поскольку при невыполнении данного условия процесс микрорезания неосуществим, необходимо корректировать установленные значения  $\eta$ .

### 3.3. Анализ путей уменьшения силовой напряженности процесса резания на операциях алмазного шлифования

В инструментальном производстве, где особенно эффективно применение алмазных кругов для шлифования твердосплавных и быстрорежущих инструментов, обработка по-прежнему ведется с использованием традиционных абразивных кругов. Это связано с тем, что алмазные круги на металлических связках в условиях высокопроизводительного съема материала работают весьма нестабильно. Использование дополнительной электрической энергии не обеспечивает высокопроизводительной правки (обработки) круга. В результате он быстро затупляется, засаливается и теряет режущую способность. В особой мере это относится к алмазным кругам на высокопрочных металлических связках типа М2-01. Данные круги обладают чрезвычайно высокой износостойкостью, однако вследствие недостаточной режущей способности не позволяют обеспечить требуемую производительность обработки. Процесс шлифования протекает с высокой силовой и тепловой напряженностью, что отрицательно сказывается на качестве и точности обработки.

С целью повышения эффективности шлифования предлагается перейти от жесткой схемы к упругой, т. е. осуществляемой с постоянным радиальным усилием. Это позволяет регулировать силовую и тепловую напряженность процесса, улучшает технологические параметры шлифования. Однако, проблема обеспечения высокой производительности обработки данным путем на практике не решается. Под этим углом зрения рассмотрим возможности повышения эффективности АИШ на основе моделирования и оптимизации процесса, используя теоретические результаты, приведенные в работах [155, 183].

Проведем теоретический анализ изменения тангенциальной  $P_z$  и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания при шлифовании, которые описываются аналитическими зависимостями:

$$P_z = \sigma \cdot S_{мгн} = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{кр}}, \quad (3.14)$$

$$P_y = \frac{P_z}{K_{ш}}, \quad (3.15)$$

где:  $\sigma$  – условное напряжение резания при шлифовании,  $H/m^2$ ;  $S_{мгн}$  – суммарная мгновенная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга,  $m^2$ ;  $Q$  – производительность обработки,  $m^3/c$ ;  $V_{кр}$  – скорость круга,  $m/c$ ;  $K_{ш} = \frac{P_z}{P_y}$  – коэффициент шлифования.

Условное напряжение резания при шлифовании  $\sigma$  связано с коэффициентом шлифования  $K_{ш}$  аналитической зависимостью [155]

$$\sigma = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{K_{ш}}. \quad (3.16)$$

Далее воспользуемся зависимостью [159] для определения условного напряжения резания  $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \sigma_{сж} \cdot HV}{(1 - \eta)}}, \quad (3.17)$$

где  $\sigma_{сж}$ ,  $HV$  – соответственно предел прочности обрабатываемого материала на сжатие и твёрдость по Виккерсу,  $H/m^2$ ;  $\gamma$  – половина угла при вершине конусообразного зерна;  $\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий степень затупления зёрен круга, изменяется в пределах  $0 \dots 1$  ( $\eta \rightarrow 0$  для острого зерна,  $\eta \rightarrow 1$  для затупленного зерна круга).

Подставляя зависимость (3.17) в зависимость (3.16), определим коэффициент шлифования  $K_{ш}$

$$K_{ш} = \sqrt{\frac{4 \cdot \sigma_{сж}}{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot HV} \cdot (1 - \eta)}. \quad (3.18)$$

Подставляя зависимости (3.16) и (3.18) в зависимости (3.14) и (3.15), имеем

$$P_z = \sqrt{\frac{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot HV \cdot \sigma_{сж}}{(1 - \eta)}} \cdot \frac{Q}{V_{кр}}, \quad (3.19)$$

$$P_y = \frac{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot HV}{2 \cdot (1 - \eta)} \cdot \frac{Q}{V_{кр}}. \quad (3.20)$$

При шлифовании по жесткой схеме (при выполнении условия  $Q = const$ ), составляющие силы резания  $P_z$  и  $P_y$  с увеличением безразмерного коэффициента  $\eta \rightarrow 1$  неограниченно увеличиваются. Это хорошо согласуется с экспериментальными данными, согласно которым в процессе шлифования по мере затупления круга (т.е. с увеличением безразмерного коэффициента  $\eta \rightarrow 1$ ) сила резания существенно возрастает, в системе появляются вибрации и ведение процесса шлифования в таких условиях становится неэффективным.

Основным условием снижения силы резания при заданной производительности обработки  $Q$  является повышение «остроты» режущих зёрен (уменьшение безразмерного коэффициента  $\eta$ ). Большой эффект в этом



плане достигается от применения алмазно-искрового шлифования. Однако, как показывает практика, стабилизировать безразмерный коэффициент  $\eta$  в процессе высокопроизводительного шлифования не удается – с течением времени обработки он постоянно увеличивается, что ведет к увеличению составляющих силы резания  $P_z$  и  $P_y$ .

В этих условиях важно найти такое решение, которое позволило бы нивелировать существенное влияние безразмерного коэффициента  $\eta$  на силу резания (составляющие силы резания  $P_z$  и  $P_y$ ).

Судя по приведенным зависимостям (3.19) и (3.20), безразмерный коэффициент  $\eta$  в меньшей мере влияет на составляющую силы резания  $P_z$ , чем на составляющую силы резания  $P_y$ . Следовательно, в процессе шлифования более эффективно зафиксировать тангенциальную составляющую силы резания  $P_z$ , т.е. обработку вести по упругой схеме с фиксированной силой  $P_z$ . Это приведет к меньшему изменению (уменьшению) производительности обработки  $Q$  с течением времени шлифования (в связи с увеличением безразмерного коэффициента  $\eta$  в условиях алмазно-искрового шлифования) по сравнению с упругой схемой при условии  $P_y = const$ . Однако реализовать на практике упругую схему шлифования с  $P_z = const$  значительно сложнее, чем упругую схему с  $P_y = const$ . Одним из эффективных вариантов реализации данной схемы можно рассматривать схему глубинного плоского или круглого (наружного и внутреннего) шлифования. В данном случае глубина шлифования  $t$  и ширина шлифования  $B$  задаются неизменными величинами.

Тогда с учетом  $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$  (где  $V_{дет}$  – скорость детали, м/с) зависимости (3.19) и (3.20) примут вид:

$$P_z = \sqrt{\frac{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot HV \cdot \sigma_{сж}}{(1-\eta)}} \cdot \frac{B \cdot V_{дет} \cdot t}{V_{кр}}, \quad (3.21)$$

$$P_y = \frac{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot HV}{2 \cdot (1 - \eta)} \cdot \frac{B \cdot V_{\text{дет}} \cdot t}{V_{\text{кр}}} \quad (3.22)$$

Как следует из зависимости (3.21), с увеличением безразмерного коэффициента  $\eta$  при заданных значениях  $P_z$ ,  $B$ ,  $t$  в процессе шлифования будет уменьшаться скорость детали  $V_{\text{дет}}$ , что приведет к уменьшению производительности обработки  $Q$ . Однако, уменьшение скорости детали  $V_{\text{дет}}$  будет не столь существенно, т.к. величины  $(1 - \eta)$  и  $V_{\text{дет}}$  входят в зависимость (3.21) с разными степенями. Здесь важно добиться того, чтобы увеличение безразмерного коэффициента  $\eta$  не выходило за определенный предел, поскольку в противном случае величина  $(1 - \eta)$  становится относительно небольшой и приводит к резкому уменьшению  $V_{\text{дет}}$  и соответственно уменьшению производительности обработки  $Q$ .

Таким образом, повысить эффективность алмазно-искрового шлифования при использовании упругой схемы с  $P_z = \text{const}$  можно, ограничивая верхний предел изменения безразмерного коэффициента  $\eta$ . Это достигается, например, периодическим прерыванием процесса шлифования на время электроэрозионной правки для восстановления режущей способности алмазного круга на металлической связке.

При использовании упругой схемы с  $P_y = \text{const}$  очевидно, что переменной величиной в процессе шлифования будет не скорость детали  $V_{\text{дет}}$ , а глубина шлифования  $t$ . Скорость детали должна быть постоянной  $V_{\text{дет}} = \text{const}$ . Тогда под действием изменяющегося (увеличивающегося) в процессе шлифования безразмерного коэффициента  $\eta$  (при заданных значениях  $P_y$ ,  $B$ ,  $V_{\text{дет}}$ ) будет непрерывно уменьшаться глубина шлифования  $t$ . Причем, значительно интенсивнее, чем скорость детали  $V_{\text{дет}}$  при шлифовании по упругой схеме с  $P_z = \text{const}$ , т.к. величины  $(1 - \eta)$  и  $t$  входят в зависимость (3.22) с одинаковой степенью.

Приведенный теоретический анализ показывает наиболее эффективные области применения алмазно-искрового шлифования, когда с течением времени обработки не удастся стабилизировать режущую способность инструмента, например, алмазного круга на высокопрочной металлической связке М2-01.

При шлифовании алмазным кругом на менее твердой металлической связке М1-01 процесс может протекать довольно стабильно в режиме самозатачивания. В этом случае можно говорить о стабилизации безразмерного коэффициента  $\eta$  во времени обработки и предпочтительности применения жесткой схемы шлифования (при выполнении условия  $Q = const$ ). Составляющие силы резания  $P_z$  и  $P_y$ , судя по зависимостям (3.21) и (3.22), будут постоянными в процессе шлифования. Поэтому нет необходимости в применении упругой схемы шлифования с  $P_y = const$ , т.к. конструктивно более просто реализовать на станке жесткую схему шлифования.

Сравнивая составляющие силы резания  $P_z$  и  $P_y$  в соответствии с зависимостями (3.19) и (3.20), видим, что тангенциальная составляющая силы резания  $P_z$  определяется произведением параметров  $HV \cdot \sigma_{сж}$ , а радиальная составляющая силы резания  $P_y$  – лишь твердостью обрабатываемого материала  $HV$ . Очевидно, с увеличением твердости обрабатываемого материала  $HV$  радиальная составляющая силы резания  $P_y$  будет пропорционально увеличиваться, а тангенциальная составляющая силы резания  $P_z$  – увеличиваться с меньшей интенсивностью, т.к. известно, что увеличение параметра  $\sigma_{сж}$  менее интенсивно, чем параметр  $HV$ . Следовательно, с увеличением твердости обрабатываемого материала  $HV$  важно уменьшить радиальную составляющую силы резания  $P_y$ .

Эффективным решением следует рассматривать увеличение скорости круга  $V_{кр}$ , т.е. чем тверже обрабатываемый материал, тем больше должна быть скорость круга.

Сделанные теоретические выводы подтверждаются практикой шлифования. Так, по данным Н. П. Иванова [72, 152], применение круглого наружного шлифования по упругой схеме при условии  $P_z = const$  позволяет повысить производительность обработки. При этом алмазный круг на металлической связке более длительное время сохраняет относительно высокую режущую способность в условиях алмазно-искрового шлифования. Кроме того, данная схема позволяет устранить вибрации, которые практически не устраняются при шлифовании по упругой схеме с  $P_y = const$ , особенно при относительно низкой режущей способности алмазного круга.

Естественно, предлагаемые решения являются «полумерами», т.к. направлены лишь на снижение отрицательной роли снижения остроты круга (безразмерного коэффициента  $\eta$ ) в формировании параметров  $P_z$  и  $P_y$  при шлифовании по жёсткой схеме или формировании производительности обработки  $Q$  при шлифовании по упругой схеме. Несомненно, главная задача состоит в устойчивой стабилизации остроты круга (безразмерного коэффициента  $\eta$ ) в процессе высокопроизводительного шлифования. Однако, это требует высокой концентрации подводимой в зону резания электрической энергии в единицу времени, что связано с рядом пока трудноразрешимых технико-экономических задач.

#### 3.4. Условия повышения производительности и снижения энергоёмкости обработки на операциях алмазного шлифования

Для оценки возможностей повышения эффективности алмазного шлифования рассмотрим аналитическую зависимость (3.20) для определения радиальной составляющей силы резания  $P_y$ , преобразуя ее с учетом зависимостей (3.13), (2.34) и (2.49):

$$P_y = 2,25 \cdot \left( \frac{R}{\bar{X}} \right)^2 \cdot \sqrt[3]{\left( \frac{m \cdot Q \cdot HV}{315 \cdot \pi} \right)^2} \cdot \frac{B \cdot \tau_{сдв}}{V_{дет} \cdot V_{кр} \cdot \rho}, \quad (3.23)$$

где  $\bar{X}$  – зернистость круга, м;  $m$  – объёмная концентрация зерен круга;  $V_{дет}$ ,  $V_{кр}$  – соответственно скорости детали и круга, м/с;  $t$  – глубина шлифования, м;  $R$  – радиус округления вершины режущего зерна, м;  $HV$ ,  $\tau_{сдв}$  – соответственно твёрдость по Виккерсу и предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала,  $H/m^2$ ;  $Q$  – номинальная производительность обработки,  $m^3/c$ ;  $B$  – ширина шлифования периферией круга, м;  $\rho = \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}$ ;  $R_{кр}$ ,  $R_{дет}$  – соответственно радиусы круга и детали, м.

В расчётной схеме режущее зерно представлено в форме шара диаметром  $\bar{X}$ . Для начального момента шлифования можно принять  $\bar{X} = 2R$ . По мере износа зерна –  $\bar{X} < 2R$ . Тогда, исходя из зависимости (3.23), в начальный момент шлифования радиальная составляющая силы резания  $P_y$  не зависит от радиуса округления вершины режущего зерна  $R$  и зернистости круга  $\bar{X}$ . В связи с износом зёрен изменение радиальной составляющей силы резания  $P_y$  обусловлено главным образом изменением величины  $R$  и отношения  $R/\bar{X}$ . Для уменьшения  $P_y$  необходимо стремиться к уменьшению отношения  $R/\bar{X}$ , т.е. уменьшению величины  $R$  и увеличению зернистости круга  $\bar{X}$ .

Первое условие выполняется при шлифовании алмазными кругами на относительно малопрочных неметаллических связках, обеспечивающих режим самозатачивания (выпадение из связки практически неизношенных зёрен). Этим можно объяснить то, что шлифование алмазными кругами на органических и керамических связках характеризуется меньшей силовой напряжённостью, чем шлифование алмазными кругами на прочных металлических связках, для которых значение  $R$  больше.

Из зависимости (3.23) также вытекает, что при шлифовании по упругой

схеме ( $P_y = const$ ) алмазными кругами на органических и керамических связках производительность обработки  $Q$  больше, чем при шлифовании алмазными кругами на металлических связках.

Основным фактором увеличения производительности обработки  $Q$  при шлифовании алмазными кругами на металлических связках является увеличение зернистости круга  $\bar{X}$ . Данное теоретическое решение согласуется с практическими результатами.

Например, установлено, что алмазные круги формы 12А2 на органической связке В2-01 обеспечивают большую производительность, чем аналогичные круги на металлической связке М1-01 при шлифовании по упругой схеме торцов колец, армированных высокотвёрдым материалом релит [189-191]. Применение периодической электроэрозионной правки алмазных кругов на связке М1-01 позволяет обеспечить их высокую режущую способность, однако в течении первых 10...15 секунд обработки производительность уменьшается до 2-х раз, тогда как режущая способность алмазных кругов на органической связке практически не изменяется вплоть до полного износа круга. Применяя алмазные круги на металлической связке с большей зернистостью, удалось заметно увеличить производительность обработки – почти до уровня производительности, достигнутой при шлифовании алмазным кругом на органической связке.

В соответствии с зависимостью (3.23), уменьшение скорости круга  $V_{кр}$  ведёт к увеличению радиальной составляющей силы резания  $P_y$ . Следовательно, скорость круга  $V_{кр}$  необходимо увеличивать, однако до определённой величины, т.к. при этом увеличивается параметр  $R$  (в связи с более интенсивным износом зерна) и, соответственно, радиальная составляющая силы резания  $P_y$ .

С увеличением твёрдости  $HV$  и предела прочности на сдвиг  $\tau_{сдв}$

обрабатываемого материала однозначно увеличивается  $P_y$ . Увеличивается также параметр  $R$ , что ведёт к ещё более интенсивному увеличению  $P_y$ . Так, установлено, что при шлифовании материалов высокой твёрдости (природных и синтетических алмазов, различных керамик) увеличение радиальной составляющей силы резания  $P_y$  происходит главным образом за счёт увеличения величины  $R$  [183].

Поэтому основным условием снижения силовой напряжённости процесса является уменьшение величины  $R$  путём обеспечения режима самозатачивания круга или применения методов непрерывной его правки. Варьирование другими параметрами, входящими в зависимость (3.23), менее эффективно, так как величина  $R$  входит с наибольшей степенью.

Вместе с тем, проведенные экспериментальные исследования процесса алмазного шлифования стекла по упругой схеме [183] показали, что уменьшение объемной концентрации зерен круга позволяет существенно увеличить производительность обработки  $Q$ . Это согласуется с решением, вытекающим из зависимости (3.23).

Применение глубинного шлифования (уменьшение скорости детали  $V_{дет}$  при условии  $Q = const$ ) ведёт к увеличению радиальной составляющей силы резания  $P_y$  согласно зависимости (3.23). Однако при этом необходимо учитывать возможность уменьшения величины  $R$  с уменьшением скорости детали  $V_{дет}$  в результате уменьшения нагрузок, действующих на отдельные зёрна круга. В итоге – снижается интенсивность роста радиальной составляющей силы резания  $P_y$ .

Уменьшить параметр  $P_y$  при глубинном шлифовании можно увеличением зернистости круга  $\bar{X}$  и уменьшением объемной концентрации зерен круга  $m$ . Это согласуется с практикой глубинного шлифования, основанного на применении крупнозернистых высокопористых абразивных

кругов, а также чрезвычайно высоких скоростей круга – до 300 м/с и более (на основании опыта западноевропейского станкостроения). Согласно зависимости (3.23), переход в область глубинного шлифования (увеличение глубины шлифования  $t$  и уменьшение скорости детали  $V_{дет}$ ) для обеспечения неизменной (заданной) радиальной составляющей силы резания  $P_y$  требует поддержания постоянным произведения  $V_{дет} \cdot V_{кр}$ , т.е. увеличения скорости круга  $V_{кр}$ .

Проведенный анализ показал, что параметры режима шлифования, характеристики круга и обрабатываемой детали влияют на радиальную составляющую силы резания  $P_y$  как непосредственно, так и косвенно - через изменение величины  $R$ .

Получены также приближённые аналитические зависимости для определения тангенциальной  $P_{z1}$  и радиальной  $P_{y1}$  составляющих силы резания, действующей в процессе шлифования на максимально выступающее из связки круга зерно:

$$P_{z1} = 4 \cdot \bar{X}^2 \cdot \sqrt[3]{HV \cdot \tau_{сдд}^2 \cdot \left( \frac{630 \cdot \pi \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр}} \right)^2}, \quad (3.24)$$

$$P_{y1} = 50 \cdot \bar{X} \cdot R \cdot \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot HV^2 \cdot \tau_{сдв} \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр}}}. \quad (3.25)$$

Зависимость (3.25) содержит, а зависимость (3.24) не содержит величину  $R$ . Следовательно, составляющая силы резания  $P_{y1}$  с течением времени обработки увеличивается в связи с увеличением величины  $R$ . Это приводит к достижению предельной нагрузки и разрушению зерна или его выпадению из связки без разрушения, т.е. составляющая силы резания  $P_{y1}$  ответственна главным образом за износ зёрен и круга в целом.

Наибольшее влияние на составляющие силы резания  $P_{z1}$  и  $P_{y1}$ ,



действующие на отдельное зерно, оказывает зернистость круга  $\bar{X}$ . С её увеличением составляющие силы резания, действующие на отдельное зерно, увеличиваются. Исходя из зависимости (3.23), с увеличением зернистости круга  $\bar{X}$  радиальная составляющая силы резания  $P_y$  уменьшается.

Следовательно, снижение силовой напряжённости процесса шлифования сопровождается увеличением нагрузок, действующих на отдельные зёрна, что может привести к более интенсивному износу круга. Однако, с увеличением зернистости увеличивается прочность и износостойкость зёрен, что в конечном итоге обеспечивает эффект применения крупнозернистых алмазных кругов.

Сравнивая зависимость (3.23) с зависимостями (3.24) и (3.25), видим, что наряду с зернистостью круга  $\bar{X}$ , противоположное влияние на  $P_y$  и соответственно на параметры  $P_{z1}$  и  $P_{y1}$  оказывает объемная концентрация зерен круга  $m$ . С точки зрения снижения силовой напряжённости процесса шлифования её эффективно уменьшать, а с точки зрения снижения силы резания, действующей на отдельное зерно круга, - увеличивать. Если учитывать влияние объемной концентрации зерен круга  $m$  на величину  $R$ , то, очевидно, с увеличением  $m$  уменьшаются параметр  $P_{y1}$  и величина  $R$ .

Исходя из зависимости (3.23), это ведёт к уменьшению радиальной составляющей силы резания  $P_y$ . Следовательно, целесообразно объемную концентрацию зерен круга  $m$  увеличивать. Однако, при шлифовании алмазными кругами на относительно малопрочных (органических и керамических) связках, когда изменение величины  $R$  незначительно, эффективно объемную концентрацию зерен круга  $m$  уменьшать с целью уменьшения радиальной составляющей силы резания  $P_y$  в соответствии с зависимостью (3.23).

Полученные теоретические решения прошли широкую апробацию при создании и внедрении высокопроизводительных процессов алмазного

шлифования различных металлических и неметаллических труднообрабатываемых материалов. В большинстве случаев они оказали решающую роль в достижении эффекта обработки, что свидетельствует об их достоверности. Достаточно отметить, например, что на операции плоского шлифования твёрдосплавных изделий алмазным кругом 1A1 300x25x5 на металлической связке M1-01 с его периодической электроэрозионной правкой переход на более высокую зернистость 160/125 – 250/200 позволил многократно повысить стойкость круга между правками и снизить его износ, т. е. кардинально решить проблему.

### 3.5. Анализ влияния объема межзеренного пространства алмазного круга на повышение эффективности шлифования

Несмотря на интенсивное развитие комбинированных процессов алмазного шлифования, основной объем алмазного шлифования выполняется в условиях, характеризующихся работой круга в режиме самозатачивания. Такое шлифование обладает рядом преимуществ и благодаря появлению новых алмазных кругов на металлических связках, работающих в режиме самозатачивания, успешно конкурирует с процессами, основанными на введении в зону резания дополнительных видов энергии.

При работе круга в режиме самозатачивания его рабочая поверхность не требует правки и формируется непосредственно в процессе взаимодействия с обрабатываемым материалом, что позволяет длительное время поддерживать высокую режущую способность круга. Процесс самоформления режущего рельефа круга – сложное явление, единое мнение о котором до настоящего времени отсутствует. Поэтому ниже приведены результаты исследования механизма самоформления режущего рельефа круга и его износа с позиций энергетического равновесия элементов системы “круг–деталь”.

Согласно принципу энергетического равновесия, режим самозатачивания

алмазного круга возможен при равенстве энергии резания и энергии, потребляемой на восстановление режущих свойств круга. Для постоянного обновления режущего рельефа необходимо, чтобы энергии резания было достаточно для разрушения изношенных зерен и их выпадения из связки. Сила резания на максимально выступающем зерне должна равняться силе разрушения зерна или превышать ее, в противном случае круг будет работать в режиме затупления и его необходимо периодически править.

Для установления условий стабилизации режущего рельефа круга, при которых в системе “круг–деталь” наступает энергетическое равновесие, воспользуемся аналитическими решениями, полученными в работе [56], применительно к врезному шлифованию прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью  $V'_{изд}$ .

В расчетной схеме величина площадки износа на зерне зависит от толщины слоя металла, срезаемого этим зерном. Исходный закон равновысотного выступания вершин зерен над уровнем связки круга, принятый равномерным, в процессе шлифования трансформируется в нормальный закон, согласно распределению площадок износа. Выражение для максимальной глубины внедрения металла в рабочую поверхность круга  $H$ , отсчитываемой от вершины исходного максимально выступающего зерна (рис. 3.3) и обуславливающей образование на поверхности обрабатываемого образца полного профиля (т.е. полный съем металла), имеет вид:

$$H = \frac{9b \cdot V'_{дет} \cdot \sigma}{k \cdot V_{кр} \cdot P}, \quad (3.26)$$

где  $b$  – максимальная высота выступания неизношенных зёрен,  $m$ ;  $k$  – поверхностная концентрация зерен,  $шт/м^2$ ;  $V_{кр}$ ,  $V'_{дет}$  – соответственно скорости круга и детали,  $м/с$ ;  $P$  – сила резания, действующая на максимально выступающее зерно,  $H$ ; – условное напряжение резания,  $H/м^2$ .

Анализ зависимости (3.26) показывает, что при одном и том же значении производительности шлифования, определяемой параметром  $V'_{дет}$ , сила резания, действующая на единичное зерно, может принимать различные значения в зависимости от степени сглаживания рельефа круга. Так, в первоначальный момент шлифования, когда круг имеет развитый рельеф, параметр  $H$  невелик, а сила резания на максимально выступающем зерне принимает наибольшее значение, что и предопределяет повышенный износ круга. С течением времени из-за увеличения линейного износа зерен и образования более сглаженного рельефа круга максимальная толщина среза  $H_{max}$  уменьшается [56] и снижает силы резания на единичных зернах, что, в свою очередь, уменьшает износ круга. Такая закономерность образования режущего рельефа будет справедлива до тех пор, пока действующая на максимально выступающее зерно сила резания не достигнет силы разрушения зерна и объемно его не разрушит, после чего включается в работу новое зерно, расположенное на более низком уровне.

При установившемся равновесии в системе “круг – деталь” режущий рельеф круга примет устойчивое стабильное состояние и износ круга во времени будет оставаться практически неизменным. Удельный расход алмазов, как показано в работе [56], с увеличением  $V'_{дет}$  уменьшится, а условное напряжение резания увеличится.

Описанный механизм износа алмазного круга при работе его в режиме самозатачивания будет иметь место при изменении  $V'_{дет}$  до определенного значения, после чего в связи с уменьшением прочности удержания зерен в связке сила, разрушающая зерно, превысит силу, удерживающую его в связке. Преобладающим видом износа в этих условиях станет выпадение не разрушенных зерен из связки, хотя одновременно часть зерен будет все же объемно разрушаться. Условием энергетического равновесия при таком механизме износа круга будет равенство силы резания на максимально

выступающем зерне и силы, удерживающей это зерно в связке.

Для установления закономерностей изменения параметра  $H$  рассмотрим схему круглого продольного шлифования и предположим, что сила удержания зерна в связке изменяется следующим образом:

$$P = P_0 - \alpha[(H + \Delta) - b], \quad (3.27)$$

где  $P_0$  – сила, разрушающая зерно,  $H$ ;  $\Delta = \frac{V'_{дет} \cdot t}{V_{кр}}$  – толщина слоя стружки,

заполняющей межзёрненное пространство круга,  $m$ ;  $t$  – глубина шлифования,  $m$ ;  $\alpha$  – размерный коэффициент.

Радиальная скорость внедрения металла в рабочую поверхность круга  $V'_{дет}$  определяется:

$$V'_{дет} = V_{дет} \cdot \sqrt{2 \cdot t} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}}, \quad (3.28)$$

где  $V_{дет}$  – скорость вращения цилиндрической детали,  $m/c$ ;  $R_{кр}$ ,  $R_{дет}$  – соответственно радиусы круга и детали,  $m$ .

После подстановки зависимостей (3.27) и (3.28) в зависимость (3.26) и решения полученного в результате преобразований квадратного уравнения относительно неизвестной величины  $H$ , имеем

$$H = \frac{1}{2\alpha} \cdot (P_0 - \alpha\Delta + \alpha b) \pm \sqrt{\frac{1}{4\alpha^2} (P_0 - \alpha\Delta + \alpha b)^2 - \frac{9b\sqrt{2t} \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}}}{\alpha \cdot k \cdot V_{кр}}}. \quad (3.29)$$

При выборе знака в зависимости (3.29) необходимо исходить из того, что с увеличением скорости детали  $V_{дет}$  или глубины шлифования  $t$  второе слагаемое в подкоренном выражении должно уменьшать параметр  $H$ , а первое – увеличивать  $H$ . Это выполняется при знаке «–».

Для упрощения зависимости (3.29) умножим и разделим ее на величину,

сопряженную  $H$  :

$$H = \frac{9b \cdot \sqrt{2t} \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}}}{\alpha \cdot k \cdot V_{кр} \left[ \frac{1}{2\alpha} (P_0 - \alpha\Delta + ab) + \sqrt{\frac{1}{4\alpha^2} (P_0 - \alpha\Delta + ab)^2 - \frac{9b\sqrt{2t} \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}}}{\alpha \cdot k \cdot V_{кр}}} \right]} \quad (3.30)$$

Так как с изменением параметров режима шлифования  $V_{дет}$  и  $t$  второе слагаемое подкоренного выражения, определяющее высоту выступания зерен над связкой, по сравнению с первым слагаемым изменяется менее интенсивно, то им можно пренебречь.

Тогда зависимость (3.30) упростится:

$$H = \frac{9b \cdot \sqrt{2t} \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}}}{k \cdot V_{кр} (P_0 - \alpha\Delta + ab)} \quad (3.31)$$

Анализ зависимости (3.31) показывает уменьшение параметра  $H$  с увеличением глубины шлифования  $t$ , что приводит к уменьшению линейного износа зерен до момента их выпадения из связки и согласно (3.27) – к увеличению сил резания, действующих на зерна.

Полученный результат обусловлен тем, что с увеличением производительности обработки уменьшение глубины заделки зерна в связке происходит менее интенсивно по сравнению с увеличением объема межзёрненного пространства, необходимого для свободного размещения слоя стружки  $\Delta$ . Режущие зёрна работают в режиме перегрузок, поскольку сила резания, действующая на максимально выступающее зерно, всегда больше разрушающей силы, что определяет повышенный удельный расход алмаза.

Необходимо отметить, что полученный результат является заниженным, т.к. в расчетах объем стружки заменяется объемом жидкости. В реальном

процессе шлифования с ростом производительности обработки параметр  $H$  должен уменьшаться более интенсивно и вызывать более интенсивный рост износа круга. Этому способствует также тот факт, что сила удержания зерна в связке менее чувствительна к изменению параметра  $H$ , чем это принято в зависимости (3.27).

Таким образом, независимо от изменения параметров режима шлифования сила удержания максимально выступающего зерна в связке приблизительно равна разрушающей силе, а глубина заделки зерна остается приблизительно постоянной. Высота выступания зерен над связкой с увеличением параметров  $V_{дет}$ ,  $t$  увеличивается.

Максимальная толщина среза, определяемая зависимостью

$$H_{max} = \frac{P}{\sigma \cdot H} \cdot \frac{1}{\left[ 1 + \sqrt{1 - \frac{P}{\sigma \cdot H^2}} \right]}, \quad (3.32)$$

и шероховатость обработанной поверхности также увеличиваются.

Анализируя зависимость параметра  $H$  от скорости детали  $V_{дет}$  и глубины шлифования  $t$ , можно видеть, что  $V_{дет}$  оказывает меньшее влияние на  $H$ . Поэтому следует ожидать менее интенсивного увеличения износа круга с увеличением скорости детали  $V_{дет}$ .

На рис. 3.4 приведены экспериментальные зависимости удельного расхода алмаза  $q$  от скорости детали  $V_{дет}$  и глубины шлифования  $t$ , полученные при круглом наружном многопроходном шлифовании стали ШХ15 ( $HRC$  58-60) алмазным кругом 1A1 200x10x3 AC15 125/100 MI-01 4, подтверждающие теоретические результаты.

С увеличением глубины шлифования  $t$  удельный расход алмаза  $q$  увеличивается.

Полученные данные хорошо согласуются с данными работы [47]. По анализу шлама, собранного после шлифования, установлено, что с увеличением

производительности обработки увеличивается число неразрушенных зерен, т.е. под действием увеличенных сил резания зерна выпадают из связки в основном без разрушения и образования значительных микросколов.

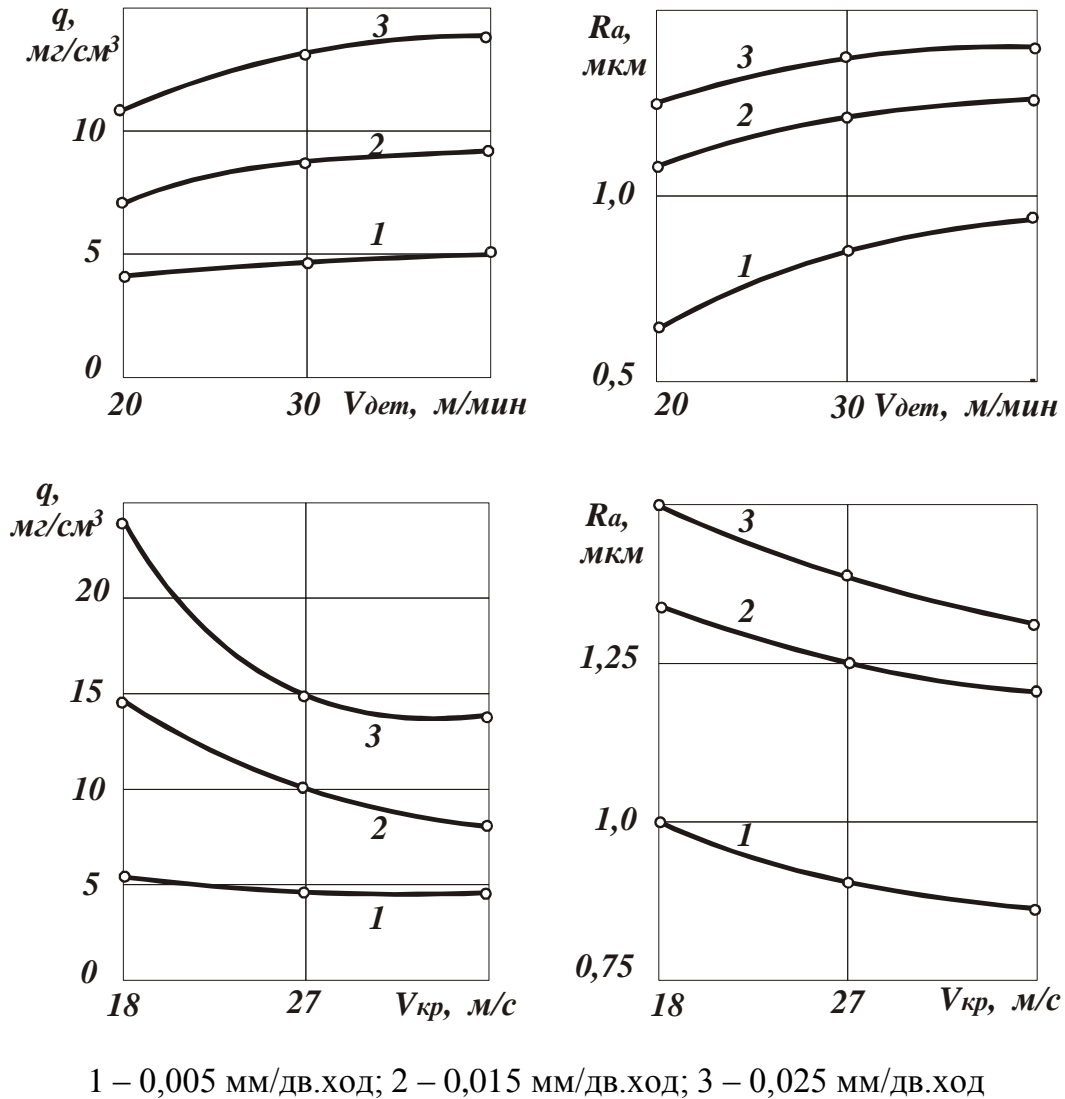


Рис. 3.4. Удельный расход алмазов и шероховатость обработанной поверхности закаленной стали ШХ15 при различной глубине шлифования

Экспериментальные исследования шероховатости обработанной поверхности также подтверждают теоретические результаты. Параметр шероховатости обработки  $R_a$  увеличивается с увеличением скорости детали  $V_{дет}$  и глубины шлифования  $t$ . С увеличением скорости круга  $V_{кр}$  параметр шероховатости обработки  $R_a$  увеличивается в соответствии с зависимостью



(3.31), что связано с уменьшением толщины слоя стружки  $\Delta$ .

Увеличение параметра  $H$  приводит к уменьшению силы резания, действующей на максимально выступающее зерно, и уменьшению износа круга. Шероховатость обработанной поверхности с увеличением  $V_{кр}$  уменьшается, поскольку уменьшается максимальная толщина среза  $H_{max}$ . Аналогичным образом влияет объемная концентрация зерен круга.

Таблица 3.3. Зависимость удельного расхода алмазов и шероховатости обработанной поверхности при шлифовании закаленной стали ШХ15 от марки алмазов и связки круга (зернистость 125/100, концентрация 100%)

$t$ , мм/дв.ход	Марка алмазов	Связка	$q$ , мг/см <sup>3</sup>	$R_a$ , мкм
0,005	АС15	М1-10	5,6	0,95
	АС15	М1-01	4,2	0,83
	АС6	М1-01	5,4	0,76
0,015	АС15	М1-10	12,3	1,25
	АС15	М1-01	8,0	1,18
	АС6	М1-01	14,2	1,02
0,025	АС15	М1-10	23,8	1,48
	АС15	М1-01	13,1	1,33
	АС6	М1-01	32,0	1,28

Установим характер изменение параметра  $H$ , износа круга и шероховатости обработанной поверхности в зависимости от прочности алмазных зерен и связки. Как следует из зависимости (3.31), с увеличением прочности зерна  $P_0$  параметр  $H$  уменьшается и увеличивает силу резания, действующую на единичное зерно. Однако интенсивность увеличения силы резания меньше интенсивности увеличения собственно прочности зерна, т.к. в выражении (3.31) сила  $P_0$  не вызывает пропорционального изменения  $H$ . Поэтому износ круга с увеличением  $P_0$  уменьшится, а критическая глубина

заделки зерна в связке, максимальная толщина среза  $H_{max}$  и шероховатость обработанной поверхности увеличатся.

В табл. 3.3 приведены экспериментальные данные, полученные при шлифовании алмазными кругами из зерен марок АС6 и АС15. Они показывают, что для более прочных алмазных зерен марки АС15 удельный расход алмазов меньше, а параметр шероховатости обработки  $R_a$  больше.

Механизм влияния характеристики связки на износ алмазного круга следующий. С увеличением прочности связки уменьшается критическая глубина заделки зерна в связке. Следовательно, зерно может получить больший линейный износ до момента его выпадения из связки, т.е. параметр  $H$  увеличивается. Сила резания, действующая на максимально выступающее зерно, при этом уменьшается и приводит к уменьшению интенсивности износа круга. В результате на рабочей поверхности круга образуется более сглаженный рельеф, шлифование которым уменьшает шероховатость обработанной поверхности.

Таким образом, применение энергетического подхода к анализу процесса шлифования позволяет раскрыть механику формирования режущего рельефа алмазного круга, работающего в режиме самозатачивания.

### 3.6. Определение и анализ максимально возможной производительности обработки при алмазном шлифовании

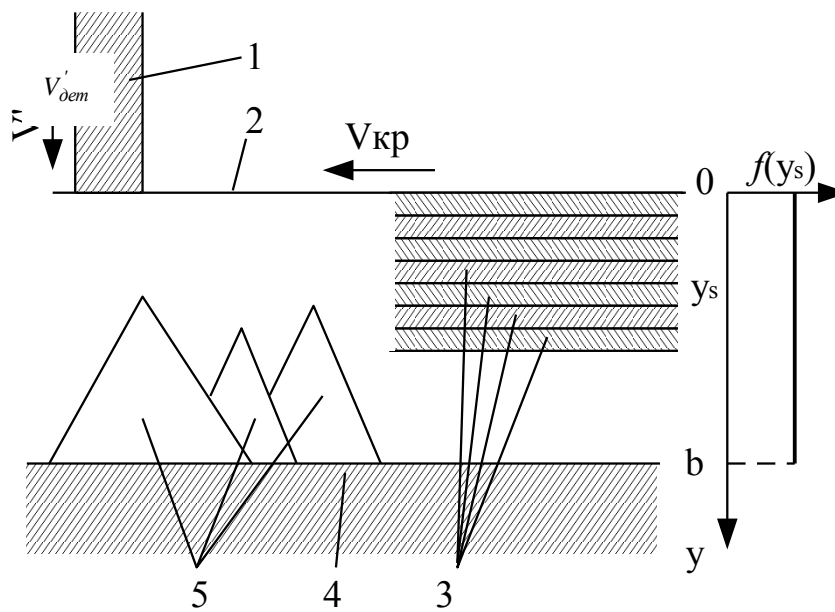
Повышение производительности обработки при съёме больших припусков в ряде случаев сдерживается относительно высоким уровнем износа круга. Существует предельная производительность обработки, превышение которой приводит к быстрой потере режущей способности круга или его интенсивному износу. В первом случае процесс шлифования прекращается, во втором – он не всегда экономически целесообразен, особенно при шлифовании кругами из сверхтвёрдых материалов. С физической точки зрения максимально

возможная (предельная) производительность обработки соответствует выполнению условия  $\eta=0$ .

Для оптимизации процесса шлифования важно установить причины повышенного износа круга и взаимосвязь скорости износа круга с основными параметрами шлифования.

Ниже приведены результаты аналитических исследований износа круга, показано влияние параметров режущего рельефа круга на интенсивность его износа.

В качестве расчётной схемы рассмотрена схема врезного шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью  $V'_{дет}$  (рис. 3.5).



- 1 – обрабатываемый образец;
- 2 – уровень максимально выступающих зёрен;
- 3 – элементарные слои зёрен;
- 4 – уровень связки;
- 5 – режущие зёрна

Рис. 3.5. Представление рабочей поверхности круга множеством элементарных слоёв зёрен

Предположим, что распределение вершин зёрен над уровнем связки подчинено равномерному закону с плотностью  $f(y_s) = 1/b$ , где  $b$  –

максимальная высота выступания вершин зёрен над уровнем связки круга. Режущий рельеф круга представим множеством элементарных слоев, содержащих  $dn_s$  вершин с различной высотой выступания над уровнем связки  $b - y_s$ . Примем, что в износе круга преобладает выпадение зерен от действия предельных нагрузок, определяемых прочностью удержания зёрен в связке. Поверхностное и объемное разрушение зерен не учитывается.

Для определения скорости износа круга  $V'_{кр}$  воспользуемся вероятностной функцией – относительной полнотой профиля круга  $\varepsilon(y)$  [56] – и рассмотрим случай, когда полный профиль круга, характеризующийся  $\varepsilon(y) = 1$ , не успевает образоваться на уровне предельной толщины среза  $H_{max}^{np}$ . В этом случае полный сьем материала элементарного слоя снимаемого припуска на уровне  $y_1$  осуществляется за время  $\Delta\tau = (H_{max}^{np} + x) / V'_{дет}$  в результате работы зёрен, вершины которых расположены в промежутке  $(y_0, y_1)$  и в промежутке  $(0, y_0)$ , равном износу круга  $x$ , имевшему место из-за перегрузки и осыпания зерен за время  $\Delta\tau$ .

$$\frac{(H_{max}^{np} + x)}{V'_{дет}} = \frac{x}{V'_{кр}} \quad (3.33)$$

или

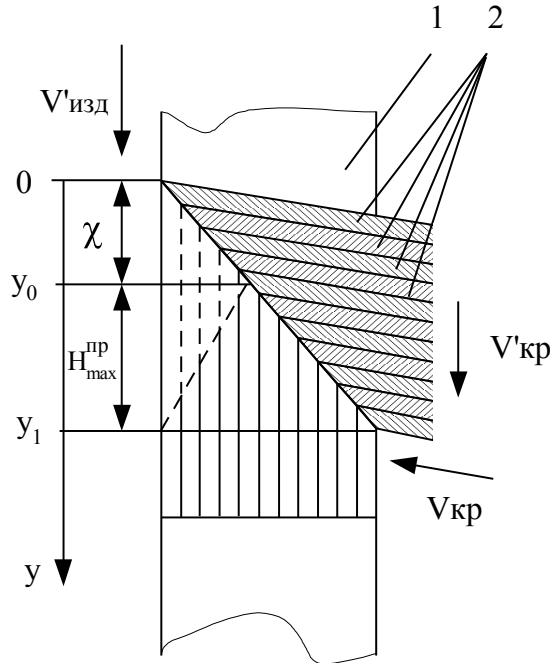
$$\frac{x}{H_{max}^{np}} = \frac{V'_{кр}}{(V'_{дет} - V'_{кр})} \quad (3.34)$$

Общее число зерен, участвующих в образовании полного профиля на уровне  $y_1$ , равно

$$n = n_0 \cdot \left( \frac{1 + x}{H_{max}^{np}} \right) = n_0 \cdot \left[ \frac{1 + V'_{кр}}{(V'_{дет} - V'_{кр})} \right], \quad (3.35)$$

где  $n_0 = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \frac{H_{max}^{np}}{V'_{дет}}$  – число зёрен, проконтактировавших с образцом за

время его перемещения в слое зерен на величину  $H_{max}^{np}$ ;  $k$  – поверхностная концентрация зерен,  $шт/м^2$ ;  $B$  – ширина круга,  $м$ ;  $V_{кр}$  – скорость круга,  $м/с$ .



1 – поверхность образца; 2 – элементарные слои зёрен

Рис. 3.6. Схема наложения элементарных слоёв зёрен на поверхность образца

Так как выпадение зёрен из связки в результате потери устойчивости не изменяет закономерности формирования относительной полноты круга, установленные в работе [56], используем аналитическую зависимость для определения  $H_{max}^{np}$  [56], которая с учётом зависимости (3.35) примет вид:

$$H_{max}^{np} = \sqrt[3]{\frac{9b \cdot V'_{дет}}{k \cdot V_{кр} \cdot \left[ 1 + \frac{V'_{кр}}{(V'_{дет} - V'_{кр})} \right]}}. \quad (3.36)$$

Разрешая зависимость (3.28) относительно  $V'_{кр}$ , получим

$$V'_{кр} = V'_{дет} \cdot \left( 1 - \frac{k \cdot V_{кр} \cdot H_{max}^{np 3}}{9b \cdot V'_{дет}} \right). \quad (3.37)$$

Представим скорость детали в виде  $V'_{дет} = r \cdot V'_{дет0}$ , где  $V'_{дет0}$  – скорость детали, при которой полный съём металла, соответствующий условию  $\varepsilon(y) = 1$ , происходит в результате работы  $n_0$  зерен при равенстве параметра  $x$  нулю;  $r$  – коэффициент, учитывающий степень неустойчивости зерна в связке,  $r \geq 1$  (чем больше  $r$ , тем больше степень неустойчивости зерен; значение  $r=1$  определяет абсолютную устойчивость).

В работе [56] получено следующее выражение:

$$k \cdot V_{кр} \cdot H_{max}^{np} = 9b \cdot V'_{дет0}. \quad (3.38)$$

Тогда зависимость (3.37) примет вид:

$$V'_{кр} = V'_{дет} \cdot \left(1 - \frac{1}{r}\right). \quad (3.39)$$

Согласно зависимости (3.39), параметр  $V'_{кр}$  непрерывно увеличивается с увеличением коэффициента  $r$ , что обусловлено изменением соотношения  $x / H_{max}^{np}$ , которое подстановкой зависимости (3.39) в (3.34) может быть представлено в виде

$$\frac{x}{H_{max}^{np}} = r - 1. \quad (3.40)$$

При условии  $r=1$  параметр  $x$  равен нулю и для полного удаления материала элементарного слоя образца достаточно  $n_0$  зерен, вершины которых расположены в промежутке величиной  $H_{max}^{np}$ . С увеличением  $r$  соотношение  $x / H_{max}^{np}$  увеличивается, и полный перевод обрабатываемого материала в стружку все в более возрастающей степени происходит от ранее проработавших зерен, количество которых  $n = n_0$  составляет все большую долю от общего числа  $n$  зерен, проработавших на полный съём.

Чрезмерная неустойчивость зерен в связке приводит к выполнению условия  $V'_{кр} \rightarrow V'_{дет}$ . В результате подводимый в зону резания материал практически не снимается, производительность обработки определяется

зависимостью

$$Q = S \cdot (V'_{дет} - V'_{кр}) = S \cdot \frac{V'_{дет}}{r}, \quad (3.41)$$

где  $S$  - площадь поперечного сечения шлифуемого образца, м<sup>2</sup>.

При абсолютной неустойчивости зерен, когда  $r=1$ , производительность обработки определяется скоростью внедрения обрабатываемого образца  $V'_{дет}$  в рабочую зону поверхности круга.

Таким образом, устойчивость зерен в связке значительно влияет на износ круга и производительность обработки. Конкретной характеристике круга соответствует определенная предельная производительность обработки, превышение которой вызывает интенсивный износ круга.

В проведенном анализе предполагалось, что предельная толщина среза  $H_{max}^{np}$  постоянна и не зависит от изменения рельефа круга в процессе шлифования. В реальном процессе шлифования прочность удержания зерен в связке различна и параметр  $H_{max}^{np}$  изменяется в зависимости от глубины заделки зерна в связке. Так, по мере износа круга высоты выступания зерен над уровнем связки круга уменьшаются, а параметр  $H_{max}^{np}$  увеличивается, что приводит, исходя из зависимости (3.37), к уменьшению  $V'_{кр}$ . При достижении определенного значения  $H_{max}^{np}$ , соответствующего абсолютной устойчивости максимально выступающего над уровнем связки зерна,  $r=1$ , скорость износа  $V'_{кр}$  от выпадения неизношенных зерен из связки равна нулю и процесс шлифования стабилизируется. В механизме износа круга начинают преобладать поверхностное и объемное разрушение зерен и затем их выпадение из связки.

Установим характер изменения параметра  $V'_{кр}$  по мере износа круга, т.е. в зависимости от параметра  $H_{max}^{np}$ , определяемого устойчивостью зерен. Если  $H_{max}^{np}$  – предельная толщина среза, при которой параметр  $x$  равен нулю для данной  $V'_{дет}$ , то по аналогии с выводом зависимости (3.39) справедливо

равенство

$$k \cdot V_{кр} \cdot H_{max}^{np}{}^3 = 9b \cdot V'_{дет} \quad (3.42)$$

и зависимость (3.37) может быть представлена в виде

$$V'_{кр} = V'_{дет} \left[ 1 - \left( \frac{H_{max}^{np}}{H_{max\phi}^{np}} \right)^3 \right]. \quad (3.43)$$

Тогда производительность обработки  $Q = S \cdot (V'_{дет} - V'_{кр})$  определится

$$Q = S \cdot V'_{дет} \cdot \left( \frac{H_{max}^{np}}{H_{max\phi}^{np}} \right)^3. \quad (3.44)$$

Из зависимостей (3.43) и (3.44) следует существенное влияние параметров  $H_{max}^{np}$  и  $H_{max\phi}^{np}$  на параметры  $V'_{кр}$  и  $Q$  (рис. 3.7).

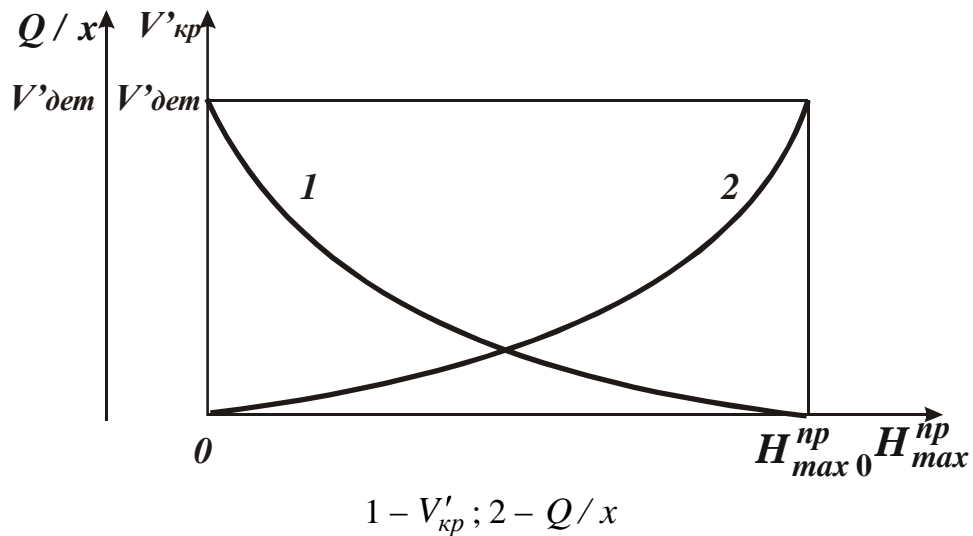


Рис. 3.7. Расчётные зависимости параметра  $V'_{кр}$  и соотношения  $Q/x$  от  $H_{max}^{np}$

При выполнении условия  $H_{max}^{np} \rightarrow H_{max\phi}^{np}$  скорость износа круга стремится к нулю, а производительность обработки – максимальна. Возможность реализации такого условия шлифования обусловлена физико-механическими



свойствами связки круга. Для органической и керамической связок параметр  $H_{max}^{np}$  незначителен и потеря устойчивости зерен наступает при относительно небольших значениях  $V'_{дет}$ . Круги на таких связках обычно работают в режиме интенсивного износа и самозатачивания.

Превышение предельного значения  $V'_{дет}$ , определяемого параметром  $H_{max}^{np}$ , не приводит к повышению производительности обработки – она остается постоянной, а параметр  $V'_{кр}$  значительно увеличивается.

Добиться увеличения производительности обработки, надежности и устойчивости процесса шлифования позволяет применение алмазных кругов на металлических связках в сочетании с их эффективной правкой. При этом для алмазного круга конкретной характеристики интенсивность удаления связки и соответствующая ей предельная производительность обработки могут быть установлены расчетным путем.

#### ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОПЫТ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ИЗНОСА И ОБНОВЛЕНИЯ РЕЖУЩЕГО РЕЛЬЕФА АЛМАЗНОГО КРУГА НА ПАРАМЕТРЫ ОПЕРАЦИЙ АИШ И ЕГО ОБОБЩЕНИЕ

Собственный ретроспективный экспериментальный и основанный на данных эксперимента аналитический исследовательский опыт других приверженцев круглого и плоского АИШ труднообрабатываемых материалов периферией шлифовального круга, а также плоского АИШ торцем шлифовального круга, охватывает более чем 35-ти летний период.

В части круглого наружного АИШ он распространяется на вольфрамкобальтовые [103, 192-199, 166, 200, 178, 201-206, 188, 207-211, 173, 212-218] и безвольфрамовые [192, 193] твердые сплавы, быстрорежущие инструментальные [194, 196] и закаленные подшипниковые [164, 219, 220] стали, износостойкие наплавки [166, 200, 202, 205, 207, 211, 173, 214, 215, 217, 218, 221-226, 165, 227-232, 168, 176, 233-236], керамические покрытия и детали двигателей внутреннего сгорания [237-241], другие конструкционные материалы [193, 242].

В части плоского АИШ – на вольфрамкобальтовые [243-247] и титановольфрамкобальтовые [248] твердые сплавы, керамические покрытия и детали двигателей внутреннего сгорания [237-241], быстрорежущие инструментальные [248], штамповые [196, 197, 208-210, 212, 213, 220, 233, 245, 248-252] и закаленные подшипниковые стали [245], другие конструкционные материалы [248, 253-257].

В части круглого внутреннего АИШ – на вольфрамкобальтовые [199, 210, 212, 213, 168, 233, 258, 169, 259-263, 171, 264-268, 106, 269] и безвольфрамовые [258] твердые сплавы, магнитотвердые материалы [166, 210, 211, 173, 212, 213, 168, 233, 258, 169, 259-263, 171, 264, 265, 268, 106, 269, 270-273], штамповые [271] и закаленные подшипниковые [168, 259-262, 264, 269] стали, керамические покрытия и детали двигателей внутреннего сгорания [241].

В части плоского торцевого АИШ – не только на материалы режущих инструментов, но и на конструкционные; например, закаленную подшипниковую сталь [274].

В этой главе рассматриваются некоторые характерные результаты этих исследований по круглому и плоскому шлифованию труднообрабатываемых материалов периферией круга – основные базы данных АИШ в контексте тематических задач и преподнесенной заголовком главы постановки.

После защиты в 1995 г. докторской диссертации на тему «Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов» одним из основателей метода АИШ Н. К. Беззубенко [60] бюджетлируемых государством исследований, обобщающих накопленный опыт дальнейшей разработки и практической реализации метода, до НИР [4] не заявлялось и не проводилось. Проект [4] явился первой подобной инициативой со стороны исследователей кафедры-родоначальника метода в новейшей истории независимой Украины и в некоторой степени, во всяком случае в тематическом поле проектных заданий, восполнил этот пробел.

К периоду выполнения проекта [4] (2013-2014 гг.) из общего числа приведенных в предыдущей части этой преамбулы к главе и отражающих как собственный экспериментальный опыт исполнителей [4], так и основанный непосредственно на таком опыте анализ и обобщение ими баз данных круглого и плоского АИШ труднообрабатываемых материалов периферией шлифовального круга ([103, 106, 164-166, 168, 169, 171, 173, 176, 178, 188, 192-273]), относятся публикации [214-218, 234-236, 252].

Вопросы плоского торцевого АИШ и соответствующие базы данных применительно к обработке сверхтвердых режущих инструментов рассмотрены [4] одновременно с решением задачи разработки экспертной системы прогнозирования шероховатости обработанных поверхностей алмазно-твердосплавных (АТП) и на основе КНБ (Томал-10) композитов.

## 4.1. Исследование параметров операции круглого наружного АИШ

### 4.1.1. Круглое наружное АИШ закаленной стали

Для анализа закономерностей алмазного многопроходного шлифования закаленной стали ШХ15 ( $HRC\ 58-60$ ) с позиций определяющей роли величины линейного износа зерна до момента его объёмного разрушения или выпадения из связки алмазного круга без разрушения в формировании основных параметров шлифования проведено сравнение экспериментальных и теоретических данных. Круглое наружное шлифование производилось алмазными кругами 1А1 200х10х3 АС15 (АС6) 125/100 4 на металлических связках М1-01 и М1-10.

Как следует из рисунка 4.1, с увеличением скорости вращения детали  $V_{дет}$  удельный расход алмаза  $q$  и параметр шероховатости обработки  $R_a$  увеличиваются, а с увеличением скорости круга  $V_{кр}$  – уменьшаются. Чем больше глубина шлифования  $t$ , тем больше параметры  $q$  и  $R_a$ .

Шлифование алмазным кругом на связке М1-10 приводит к увеличению значений параметров  $q$  и  $R_a$  по сравнению с шлифованием алмазным кругом на связке М1-01 (табл. 4.1). Данные закономерности наблюдаются для всех исследуемых глубин шлифования.

Проведем анализ параметра шероховатости обработки  $R_a$ , используя зависимость (2.51). Как видим, параметр  $R_a$  увеличивается с увеличением скорости детали  $V_{дет}$  и уменьшением скорости круга  $V_{кр}$  и не зависит явно от глубины шлифования  $t$ . Влияние  $t$  на  $R_a$  может быть обусловлено изменением безразмерного коэффициента  $\eta$ .

Этот коэффициент  $\eta$  равен отношению величины линейного износа максимально выступающего над уровнем связки зерна  $x$  к максимальной (условной) глубине внедрения зерна в обрабатываемый материал  $H$  (т. е.  $\eta = x/H$ ; подробнее, например, во второй главе, подраздел 2.1, где  $x \equiv \Delta_{max}$ ).

Безразмерный коэффициент  $\eta$  устанавливается из уравнения:

$$\frac{\eta^3}{(1-\eta^2)} = \left(\frac{x}{H_0}\right)^3. \quad (4.1)$$

Параметры  $H$  и  $H_0$  определяются зависимостью (2.49);  $H_0 = H$  при  $\eta = 0$ .

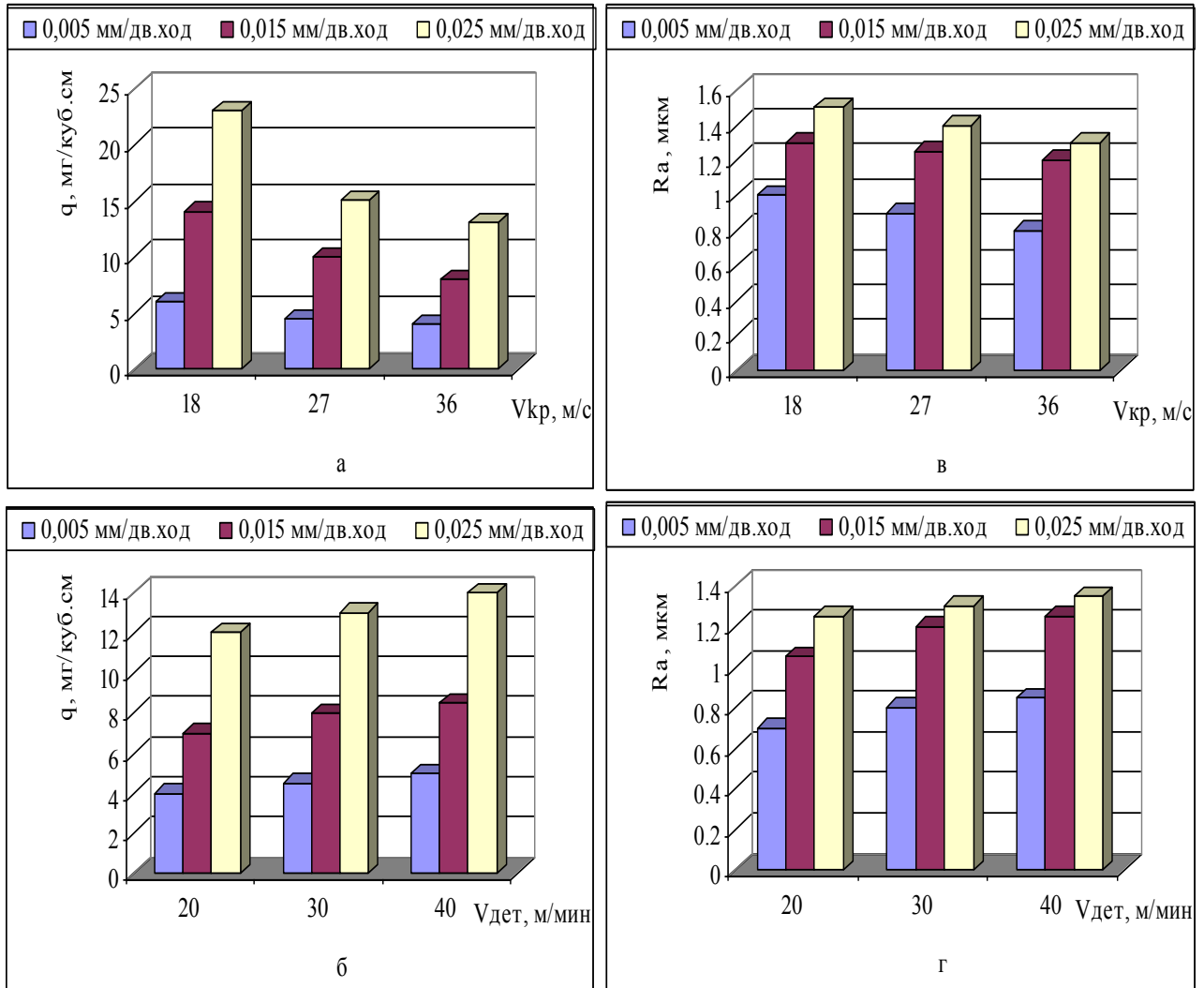


Рис. 4.1. Изменение удельного расхода алмаза  $q$  и шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  в зависимости от скорости круга  $V_{кр}$  и скорости детали  $V_{дет}$  при различных глубинах шлифования [219]

Численными расчетами установлено, что при  $\eta < 0,8$  отношение  $x/H_0$  принимает значения, близкие к  $\eta$ , а при  $0,8 < \eta < 1,0$  – значения, близкие к

$$1/\sqrt[3]{1-\eta^2}.$$

Следовательно, с достаточной для практики точностью при  $\eta < 0,8$  можно принять  $\eta = x/H_0$ , а при  $0,8 < \eta < 1,0$  —  $x/H_0 = 1/\sqrt[3]{1-\eta^2}$ .

Тогда при  $\eta < 0,8$  величина  $(1 - \eta)$  определится как:

$$1 - \eta = 1 - x \cdot \sqrt[3]{\frac{m \cdot V_{кр}}{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}}. \quad (4.2)$$

При  $0,8 < \eta < 1,0$ :

$$1 - \eta = \left(\frac{\bar{X}}{x}\right)^3 \cdot \frac{630 \cdot \pi \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр}}. \quad (4.3)$$

Согласно зависимостям (4.2) и (4.3), величина  $(1 - \eta)$  тем больше, чем больше глубина шлифования  $t$  и меньше величина линейного износа зерна  $x$ . При  $0,8 < \eta$  влияние параметров  $t$  и  $x$  на величину  $(1 - \eta)$  менее существенно, чем при  $0,8 < \eta < 1,0$ .

Таблица 4.1. Удельный расход алмазов  $q$  и шероховатость обработанной поверхности  $R_a$  при шлифовании закаленной стали ШХ15

$t$ , мм/дв.ход	0,005			0,015			0,025		
Марка алмаза	АС15		АС6	АС15		АС6	АС15		АС6
Марка связки	М1-10	М1-01		М1-10	М1-01		М1-10	М1-01	
$q$ , мг/см <sup>3</sup>	5,6	4,2	5,4	12,3	8,0	14,2	23,8	13,1	32,0
$R_a$ , мкм	0,95	0,83	0,76	1,25	1,18	1,02	1,48	1,33	1,28

Таким образом показано, что влияние глубины шлифования  $t$  на параметр шероховатости обработки  $R_a$  происходит за счёт увеличения величины  $(1 - \eta)$  или уменьшения безразмерного коэффициента  $\eta$ .

Применение алмазных зерен АС15 вследствие снижения прочности их удержания в металлической связке круга приводит к уменьшению величины  $x$  (соответственно безразмерного коэффициента  $\eta$ ) и увеличению параметра шероховатости обработки  $R_a$ . Применение более прочной металлической связки М1-01 приводит к увеличению параметров  $x$ ,  $\eta$  и уменьшению  $R_a$ .

Удельный расход алмаза  $q$  определяется зависимостью (3.6); при заданных значениях  $Q$  и  $M$  удельный расход алмаза  $q$  увеличивается с уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta$ . Согласно приведенным экспериментальным данным, с увеличением глубины шлифования  $t$  удельный расход алмаза  $q$  и производительность обработки  $Q$  увеличиваются, что свидетельствует об уменьшении безразмерного коэффициента  $\eta$ .

С увеличением скорости детали  $V_{дет}$  удельный расход алмаза  $q$  и производительность обработки  $Q$  увеличиваются, а безразмерный коэффициент  $\eta$  уменьшается.

С увеличением скорости круга  $V_{кр}$  удельный расход алмаза  $q$  уменьшается, а производительность остается почти постоянной. Согласно зависимости (3.7), это приводит к увеличению безразмерного коэффициента  $\eta$ , что находится в соответствии с зависимостями (4.2) и (4.3).

Применение более прочной связки М1-01 приводит к уменьшению удельного расхода алмаза  $q$ , что связано с увеличением  $\eta$  и  $x$ .

Применение более прочных алмазных зерен АС15 снижает удельный расход алмаза  $q$ . Согласно зависимости (3.9), это обусловлено главным образом увеличением параметра  $c$ .

Таким образом, проведенный анализ показал, что характер изменения удельного расхода алмаза  $q$  и параметра шероховатости обработки  $R_a$  вполне однозначно определяется изменением физических параметров  $\eta$  и  $x$ . Управлять процессом можно за счет изменения параметров  $\eta$  и  $x$  путем

изменения характеристик круга, режимов шлифования и других условий обработки.

Уменьшить параметры  $q$  и  $R_a$  можно увеличением параметров  $\eta$  и  $x$ . Согласно зависимости (3.7), при условии  $\eta \rightarrow 0$  удельный расход алмаза  $q$  стремится к бесконечности. Следовательно, должны существовать оптимальные значения параметров  $\eta$  и  $x$ , обеспечивающие экономически обоснованный удельный расход алмаза и требуемые значения шероховатости обработки. Определить их можно расчетно-экспериментальным путем на основе приведенных выше расчетных зависимостей.

#### 4.1.2. Круглое наружное АИШ теплостойкой наплавки

Существенным фактором повышения долговечности машин, как при их изготовлении, так и ремонте, является использование методов нанесения на рабочие поверхности деталей износостойких покрытий. Однако при этом возникает проблема обработки покрытий, особенно твердостью  $HRC \geq 45 \dots 50$ , в том числе теплостойких хромовольфрамовых и хромомолибденовых наплавки. Теплостойкие наплавки применяются, как правило, для повышения износостойкости деталей, работающих в условиях повышенных нагрузок и температур. Широкое применение они получили для восстановления и повышения износостойкости валков прокатных станков, в основном – горячей прокатки.

Эффективность использования теплостойких наплавки во многом зависит от решения проблемы их высокопроизводительной и качественной обработки. Перспективным решением следует рассматривать использование АИШ. В результате повышается производительность обработки, уменьшаются сила и температура резания, улучшается качество обработанных поверхностей.

Для оценки технологических возможностей АИШ проведены экспериментальные исследования по схеме круглого наружного шлифования



наплавки типа 3Х2В8 алмазными кругами зернистостью 250/200 с 25 % объемом алмазного порошка в алмазоносном слое на металлических связках М1-01, М1-04, М1-10, М2-01, М2-09, М2-12. Режимы шлифования:  $V_{кр} = 25$  м/с;  $V_{дет} = 40$  м/мин;  $S_{пр} = 0,8$  м/мин;  $S_{нон} = 10$  мкм/дв.ход. В качестве источника технологического тока использовался генератор ИТТ-35, амплитудное напряжение импульсов  $U = 40$ В. Экспериментальные данные по производительности обработки и удельному расходу алмаза приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2. Экспериментальные значения  $Q$ ,  $q$  и произведения  $q \cdot Q$  [228]

Код связки	М1-10	М2-01	М2-09	М1-04	М2-12	М1-01
$Q$ , см <sup>3</sup> /мин	1,65	1,6	1,65	1,6	1,55	1,5
$q$ , мг/см <sup>3</sup>	19	20	21	23	28	31
$q \cdot Q$ , мг/мин	31,4	32,0	34,7	36,8	43,4	46,5

Значения производительности обработки  $Q$  для различных кругов отличаются незначительно, т.к. шлифование осуществлялось по жесткой схеме. Различия удельного расхода алмаза  $q$  – значительны. Лучшие результаты показали алмазные круги на металлических связках М1-10, М2-01, М1-04, М2-09. Алмазные круги на связках М2-12 и М1-01 интенсивно изнашиваются, о чем свидетельствуют высокие значения удельного расхода алмаза.

Для теоретического анализа полученных результатов воспользуемся аналитической зависимостью для определения удельного расхода алмаза (3.9).

Как следует из зависимости (3.9), при фиксированных значениях  $M$  и  $Q$  (рассматриваемый случай) удельный расход алмаза  $q$  увеличивается с уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta \rightarrow 0$ , т.е. с уменьшением величины износа зерен круга  $x$ .

Согласно приведенным в табл. 4.2 экспериментальным данным, произведение параметров  $q \cdot Q$  для связок М2-12 и М1-01 больше, чем для других исследуемых связок. Исходя из зависимости (3.9), безразмерный коэффициент  $\eta$  для этих связок меньше. Это указывает на то, что меньше величина линейного износа зерна до момента его выпадения из связки в силу относительно низкой прочности связки. Для связок М1-10, М2-01, М1-04, М2-09 безразмерный коэффициент  $\eta$  больше, т.е. больше степень затупления зерен и больше их ресурс работы в круге. Этим объясняется меньший износ алмазных кругов на указанных связках.

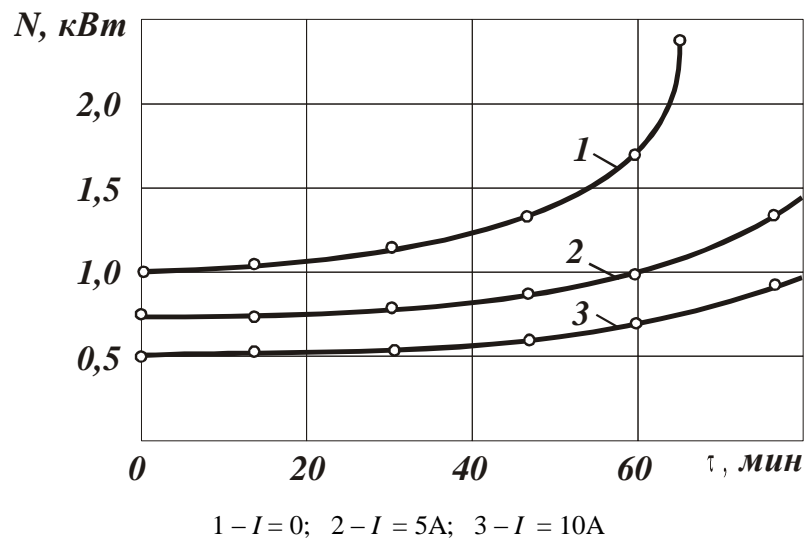
Более интенсивный износ кругов на связках М2-12 и М1-01 в большей степени позволяет использовать их в режиме самозатачивания – при отключенном источнике технологического тока, тогда как алмазные круги на других исследуемых связках, особенно М1-10 и М2-01 требуют непрерывной или периодической электроэрозионной правки. В противном случае через определенное время обработки производительность процесса уменьшается. Например, через 30 минут работы без электрического тока производительность обработки алмазным кругом на связке М2-01 уменьшилась в 2,5 раза. При этом алмазные зерна почти не выступают над уровнем связки круга.

Действие импульсных электрических разрядов на алмазный круг при АИШ заключается в основном в удалении тонких слоев круга в результате локального оплавления и испарения, в разрушении налипших частиц и продуктов засаливания. Это обеспечивает непрерывное выступание алмазных зерен над поверхностью связки, уменьшает контакт ее с обрабатываемым материалом и способствует сохранению высокой режущей способности круга. Электроэрозионная правка является дополнительным фактором управления и стабилизации процесса шлифования, позволяет обеспечить оптимальные условия работы круга при любых режимах обработки. Установлено, что введение в зону резания электрических разрядов повышает производительность обработки для всех исследуемых

связок кругов и позволяет работать на более жестких режимах.

#### 4.2. Исследование параметров операции плоского АИШ штамповой стали

Экспериментально установлено, что с течением времени обработки штамповой стали твёрдостью  $HRC\ 62\dots64$  мощность резания при обычном алмазном (плоском) шлифовании неограниченно увеличивается, а при АИШ длительное время остаётся почти постоянной, рис. 4.2. Чем больше сила тока  $I$ , тем меньше мощность резания  $N$ , т.е. выше режущая способность алмазного круга на металлической связке.



Обрабатываемый материал – сталь ХЗФ8; алмазный круг – 1А1 250х15х5 АС6 100/80 М2-01 4; режим шлифования –  $V_{кр} = 35\text{ м/с}$ ,  $V_{дет} = 10\text{ м/с}$ ,  $S_{нон} = 3,3\text{ мм/дв. ход}$ ,  $t = 0,018\text{ мм}$ ; номинальная производительность обработки  $Q = 300\text{ мм}^3/\text{мин}$

Рис. 4.2. Зависимость мощности резания  $N$  от времени обработки  $\tau$  [237]

В общем виде мощность резания  $N$  описывается зависимостью

$$N = P_z \cdot V_{кр}, \quad (4.4)$$

где  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания,  $H$ ;  $V_{кр}$  – скорость круга,  $\text{м/с}$ .

Выразим тангенциальную составляющую силы резания  $P_z$  зависимостью

$$P_z = \sigma \cdot S_{мгн} = \frac{\sigma \cdot Q}{V_{кр}}, \quad (4.5)$$

где  $\sigma$  – условное напряжение резания,  $H/m^2$ ;  $S_{мгн}$  – суммарная мгновенная площадь среза всеми одновременно работающими зёрнами круга,  $m^2$ ;  $Q$  – фактическая производительность обработки,  $m^3/c$ .

Тогда мощность резания  $N$  выразится

$$N = \sigma \cdot Q. \quad (4.6)$$

В работе [159] приведена зависимость для определения условного напряжения резания  $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\pi \cdot \text{tg} \gamma \cdot \sigma_{сж} \cdot HV}{(1 - \eta)}}, \quad (4.7)$$

где  $\sigma_{сж}$ ,  $HV$  – соответственно предел прочности обрабатываемого материала на сжатие и твёрдость по Виккерсу,  $H/m^2$ ;  $\gamma$  – половина угла при вершине конусообразного зерна;  $\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий степень затупления зёрен круга, изменяется в пределах  $0 \dots 1$  ( $\eta \rightarrow 0$  для острого зерна,  $\eta \rightarrow 1$  для затупленного зерна круга).

Исходя из зависимости (4.7), условное напряжение резания  $\sigma$  тем больше, чем больше параметры  $\sigma_{сж}$ ,  $HV$  и  $\eta$ . При  $\eta \rightarrow 1$  условное напряжение резания стремится к бесконечности ( $\sigma \rightarrow \infty$ ) и процесс резания отсутствует.

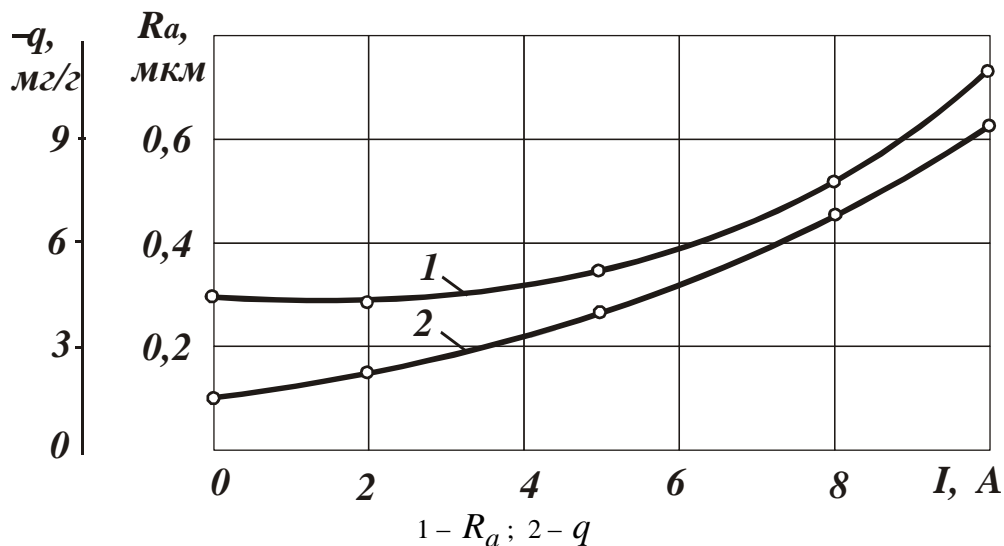
Следовательно, увеличение мощности резания  $N$  с течением времени обработки при условии  $Q = const$ , как показано на рис. 4.2, в соответствии с зависимостью (4.6) обусловлено увеличением условного напряжения резания  $\sigma$ . При этом, согласно зависимости (4.7), имеет место увеличение безразмерного коэффициента  $\eta$ .

В условиях обычного алмазного шлифования (т.е. при условии  $I=0$ ) мощность резания  $N$  через определённое время обработки практически

стремится к бесконечности. Согласно зависимости (4.7), это соответствует случаю  $\eta \rightarrow 1$ , когда алмазный круг полностью теряет режущую способность и съём металла отсутствует.

При АИШ безразмерный коэффициент  $\eta$  меньше, чем при обычном алмазном шлифовании, вследствие меньших значений мощности резания  $N$ , рис. 4.2.

Увеличение силы тока  $I$  ведёт к уменьшению мощности резания, однако при этом увеличиваются шероховатость обработанной поверхности  $R_a$  и удельный расход алмаза  $q$ , рис. 4.3.



Обрабатываемый материал – сталь Х3Ф8;

алмазный круг – 1А1 250х15х5 АС6 100/80 М2-01 4;

режим шлифования –  $V_{кр} = 35$  м/с,  $V_{дет} = 10$  м/с,  $S_{нон} = 3,3$  мм/дв. ход,  $t = 0,018$  мм;

номинальная производительность обработки  $Q = 300$  мм<sup>3</sup>/мин.

Рис. 4.3. Зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  и удельного расхода алмаза  $q$  от силы тока  $I$  [237]

Проведём теоретический анализ экспериментальных данных, для чего воспользуемся аналитическими зависимостями (2.51) и (3.9) для расчёта параметра шероховатости обработки  $R_a$  и удельного расхода алмаза  $q$ .

Исходя из зависимости (2.51), параметр шероховатости обработки  $R_a$  увеличивается с уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta$ . Как показано выше, с увеличением силы тока  $I$  безразмерный коэффициент  $\eta$  уменьшается, что и предопределяет увеличение параметра шероховатости обработки  $R_a$  для заданной производительности обработки  $Q$ .

Таким образом, в результате более интенсивного электроэрозионного воздействия на рабочую поверхность алмазного круга с увеличением силы тока  $I$  обеспечивается повышение режущей способности круга за счёт формирования и поддержания на его рабочей поверхности более развитого режущего рельефа.

Таблица 4.3. Значения произведения параметров  $q \cdot Q$

$I, A$	0	2	4	6	8	10
$q \cdot Q,$ $\frac{мг}{г} \cdot \frac{мм^3}{мин}$	450	690	960	1350	2100	3300

Исходя из зависимости (3.9), с уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta$  при условии  $Q = const$  удельный расход алмаза  $q$  однозначно увеличивается. Следовательно, увеличение удельного расхода алмаза  $q$  и произведения параметров  $q \cdot Q$  (табл. 4.3) в соответствии с экспериментальными данными, приведенными на рис. 4.3, обусловлено уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta$ . Из этого можно заключить, что подвод в зону резания электрического тока, с одной стороны, способствует уменьшению мощности резания (рис. 4.2), с другой стороны, – увеличению шероховатости обработки и удельного расхода алмаза в связи с уменьшением величины линейного износа зёрен до момента их объёмного разрушения и выпадения из связки круга (уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta$ ). В результате ресурс работы зёрен в круге уменьшается.

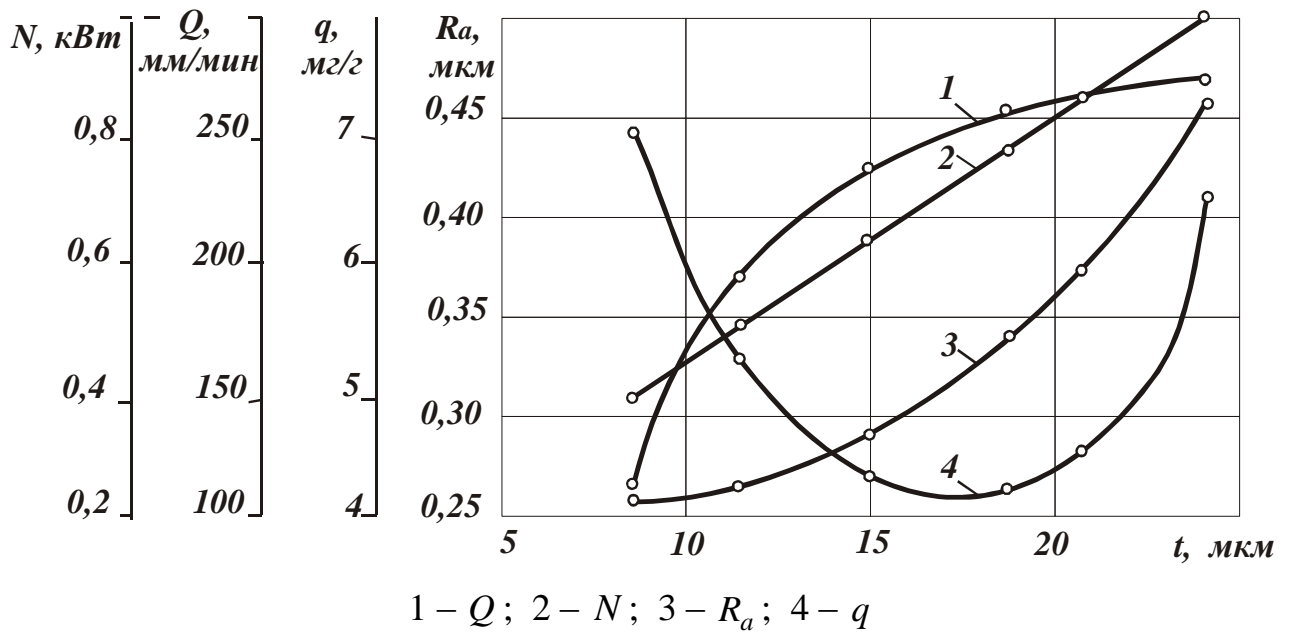
Исходя из зависимости (3.9), при значительном уменьшении безразмерного коэффициента  $\eta$  ( $\eta \rightarrow 0$ ) удельный расход алмаза  $q$  стремится к бесконечности. Следовательно, должны существовать оптимальные значения безразмерного коэффициента  $\eta$  и, соответственно, оптимальные значения силы тока  $I$ .

Для анализа закономерностей процесса алмазно-искрового шлифования штамповых сталей была проведена серия экспериментов по установлению влияния глубины шлифования на основные параметры процесса: производительность обработки  $Q$ , шероховатость обработанной поверхности  $R_a$ , мощность резания  $N$  и удельный расход алмаза  $q$ , рис. 4.4.

Как видим, с увеличением глубины шлифования  $t$  параметры  $Q$ ,  $R_a$ ,  $N$  непрерывно увеличиваются, а удельный расход алмаза  $q$  изменяется по экстремальной зависимости (первоначально уменьшается, затем увеличивается, проходя точку минимума). Наличие минимума удельного расхода алмаза  $q$  позволяет подойти к выбору оптимальных условий обработки.

Характер изменения зависимостей производительности обработки  $Q$  и мощности резания  $N$  от глубины шлифования  $t$  отличается, рис. 4.4. Производительность обработки  $Q$  увеличивается более интенсивно. Согласно зависимостям (4.6) и (4.7), это связано с тем, что с увеличением глубины шлифования  $t$  условное напряжение резания  $\sigma$ , как и безразмерный коэффициент  $\eta$ , уменьшается. При этом, в соответствии с зависимостью (2.51), уменьшается параметр шероховатости обработки  $R_a$ , что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Наличие экстремума зависимости удельного расхода алмаза  $q$  от глубины шлифования  $t$ , показанной на рис. 4.4, связано с противоположным влиянием производительности обработки линейного износа зёрен (параметров  $Q$  и  $\eta$ ) на удельный расход алмаза  $q$  в зависимости (3.9).



Обрабатываемый материал – сталь Х3Ф8; алмазный круг – 1А1 250х15х5 АС6 100/80 М2-01 4; режим шлифования –  $I=5A$ ,  $V_{кр} = 35m/c$ ,  $V_{дет} = 10m/c$ ,  $S_{non} = 3,3$  мм/дв. ход

Рис. 4.4. Зависимость производительности обработки  $Q$ , мощности резания  $N$ , параметра шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  и удельного расхода алмаза  $q$  от глубины шлифования  $t$  [237]

С увеличением глубины шлифования  $t$ , в результате увеличения производительности обработки  $Q$ , удельный расход алмаза  $q$  уменьшается. При достижении  $t=0,017$  мм преобладающее влияние на удельный расход алмаза оказывает линейный износ зёрен, отражением которого является безразмерный коэффициент  $\eta$ , уменьшающийся, как показано выше, с увеличением глубины шлифования  $t$ . Уменьшение безразмерного коэффициента  $\eta$  ведёт к увеличению удельного расхода алмаза  $q$ , что соответствует экспериментальным данным.

В таблице 4.4 приведены значения произведения параметров  $q \cdot Q$ , полученные на основе экспериментальных данных удельного расхода алмаза  $q$  и производительности обработки  $Q$ , рис. 4.4. Как видно, с увеличением глубины шлифования  $t$  произведение параметров  $q \cdot Q$  увеличивается.



Следовательно, уменьшается безразмерный коэффициент  $\eta$ .

Таблица 4.4 – Значения произведения параметров  $q \cdot Q$

$t$ , мкм	8	10	15	20	25
$q \cdot Q,$ $\frac{мг}{г} \cdot \frac{мм^3}{мин}$	770	1010	1020	1140	1760

Таким образом показано, что характер изменения основных параметров шлифования обусловлен изменением безразмерного коэффициента  $\eta$  в связи с изменением степени износа зёрен круга (состоянием режущего рельефа круга). Очевидно, существует оптимальное значение безразмерного коэффициента  $\eta$ , поддержание которого в процессе алмазного электроэрозионного шлифования обеспечивает наибольший эффект обработки.

Из рисунка 4.4 следует, что при  $t=0,017$  мм зависимость  $R_a—t$  имеет точку перегиба, при  $t>0,017$  мм шероховатость обработки  $R_a$  начинает интенсивно увеличиваться. Это указывает на то, что при  $t>0,017$  мм безразмерный коэффициент  $\eta$  начинает более интенсивно уменьшаться, что собственно и приводит к интенсивному росту удельного расхода алмаза  $q$  и наличию экстремума зависимостей  $q—t$ .

Аналогичные экспериментальные зависимости получены при изменении других параметров режима плоского алмазного шлифования: скорости стола станка и поперечной подачи. Установлено наличие минимума функции удельного расхода алмаза, обусловленного существованием экстремального значения безразмерного коэффициента  $\eta$ .

#### 4.3. Исследование параметров операции внутреннего АИШ материалов повышенной твердости

Количество подводимой в зону резания электрической энергии определяет интенсивность разрушения металлической связки круга и продолжительность работы зерна в круге. Чем больше количество подводимой электрической энергии, тем меньше ресурс работы зерна, так как линейный износ его до момента выпадения из связки уменьшается. С одной стороны, это ведёт к увеличенному износу круга, с другой – к повышению режущей способности круга за счёт повышения остроты режущих кромок зёрен, увеличению производительности обработки, снижению сил и температуры резания.

Как видим, имеет место противоречие, что предопределяет существование оптимального количества подводимой электрической энергии (оптимальной величины линейного износа зерна до момента его выпадения из связки), обеспечивающей наименьший удельный расход алмаза и наибольшую производительность обработки.

Для анализа с этих позиций полученных экспериментальным путем закономерностей внутреннего АИШ воспользуемся аналитическими зависимостями, полученными в подразделе 3.1 и увязывающими скорость износа связки круга  $V_{св}$  с удельным расходом алмаза  $q$ .

Исходя из зависимости (3.9), безразмерный коэффициент  $\eta$  вполне однозначно определяется произведением параметров  $q \cdot Q$ , соответствующим скорости износа круга (скорости износа связки круга  $V_{св}$ ). С увеличением произведения параметров  $q \cdot Q$  безразмерный коэффициент стремится к нулю ( $\eta \rightarrow 0$ ). В этом случае зерна выпадают из связки круга, практически не претерпев линейного износа (в исходном состоянии).

Для оценки теоретических результатов была проведена серия экспериментов по внутреннему АИШ магнитотвёрдого материала ЮНДК24Т2

кругом 1A1 25x10x3 AC6 125/100 M2-01 4 на внутришлифовальном станке модели 3K227BP ( $V_{кр} = 20$  м/с;  $V_{дет} = 50$  м/мин;  $S_{прод} = 3$  м/мин;  $S_{нон} = 0,1$  мм/мин). Использовались источник постоянного тока ВАКР 630/12 и генератор униполярных импульсов ВГ-3В (1-22кГц), в качестве СОТС – 3% содовый раствор.

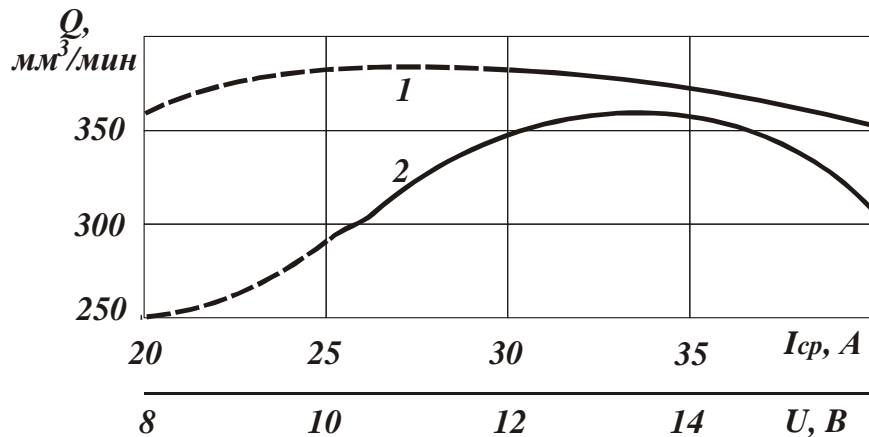
В результате проведенных экспериментов установлено, что с увеличением количества подводимой электрической энергии (мощности  $N = I_{cp} \cdot U$ , где  $I_{cp}$  – среднее значение силы тока, А;  $U$  – напряжение, В) производительность обработки  $Q$  для двух рассматриваемых источников технологического тока первоначально увеличивается, затем несколько уменьшается, а удельный расход алмаза  $q$ , наоборот, первоначально уменьшается, затем увеличивается (рис. 4.5). Использование генератора униполярных импульсов ВГ-3В позволяет увеличить производительность обработки и уменьшить удельный расход алмаза.

В таблице 4.5 приведены значения произведения параметров  $q \cdot Q$ , полученные на основе экспериментальных данных удельного расхода алмаза  $q$  и производительности обработки  $Q$ , рис. 4.5.

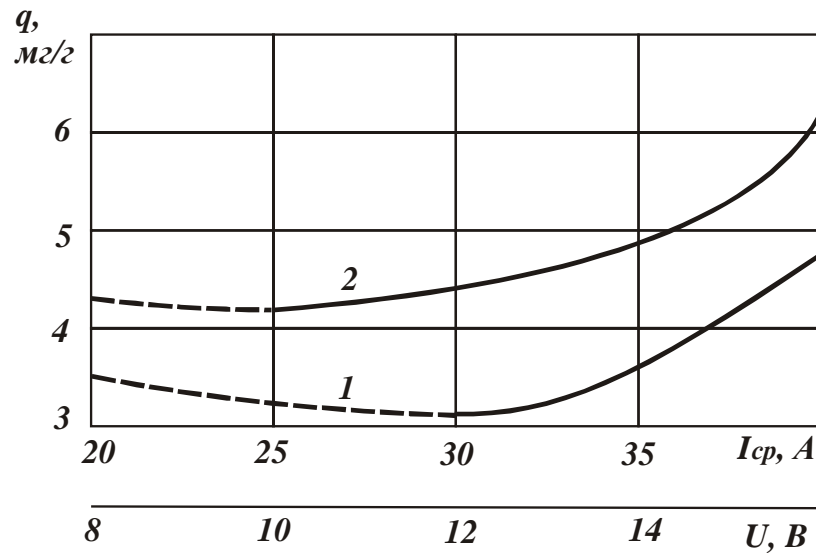
Из табл. 4.5 следует, что произведение параметров  $q \cdot Q$  с увеличением силы тока  $I_{cp}$  (и напряжения  $U$ ) увеличивается. Следовательно, исходя из зависимости (3.9), уменьшается безразмерный коэффициент  $\eta$ . Это указывает на уменьшение величины линейного износа зёрен до момента выпадения их из связки круга и повышение их режущей способности (уменьшение на зёрнах площадок износа), что собственно и является причиной увеличения параметров  $Q$  и  $q$ .

Некоторое уменьшение производительности обработки  $Q$  при увеличенных значениях  $I_{cp}$  и  $U$  связано с существенным увеличением размерного износа алмазного круга и несоответствием номинального и

фактического значений поперечной подачи  $S_{non}$ .



а



б

1 – источник тока ВГ-3В; 2 – источник тока ВАКР 630/12

Рис. 4.5. Зависимости производительности обработки  $Q$  и удельного расхода алмаза  $q$  от силы тока  $I_{cp}$  и напряжения  $U$  [198]

Таким образом, полученное теоретическое решение, описываемое зависимостью (3.9), согласуется с экспериментальными данными и свидетельствует о преобладающем влиянии размерного износа зёрен (определяемом безразмерным коэффициентом  $\eta$ ) на выходные показатели процесса алмазно-искрового шлифования. Для эффективного ведения процесса

размерным износом зёрен (безразмерным коэффициентом  $\eta$ ) необходимо управлять за счёт регулирования количества подводимой в зону резания дополнительной электрической энергии.

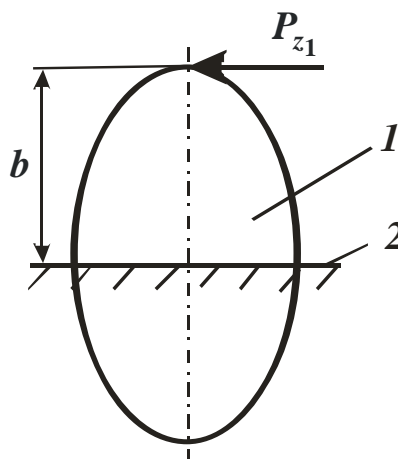
Таблица 4.5. Значения произведения параметров  $(q \cdot Q)_1$  и  $(q \cdot Q)_2$  для двух источников тока: 1 – источник тока ВГ-3В; 2 – источник тока ВАКР 630/12

$I_{cp}, A$	20	25	30	35	40
$(q \cdot Q)_1$	1250	1260	1270	1380	1700
$(q \cdot Q)_2$	1070	1210	1540	1760	1970

Очевидно, чем меньше безразмерный коэффициент  $\eta$ , тем меньше сила резания, действующая на отдельное зерно круга при шлифовании по жёсткой схеме. Для обеспечения выпадения зерна из связки при действии на него меньшей силы  $P_{z1}$ ,  $H$  (тангенциальной составляющей силы резания, действующей на отдельное зерно), высота выступания зерна над уровнем связки  $b$ ,  $m$ , должна быть больше, рис. 4.6. Это вытекает из условия:

$$M_1 = P_{z1} \cdot b = const, \quad (4.8)$$

где  $M_1$  – момент от силы  $P_{z1}$ ,  $H \cdot m$ .



1 – зерно; 2 – уровень связки круга

Рис. 4.6. Расчетная схема

Следовательно, уменьшение тангенциальная составляющая силы резания  $P_{z1}$ , действующей на отдельное зерно круга, при уменьшении безразмерного коэффициента  $\eta$  предопределяет увеличение величины  $b$  и, соответственно, объёма межзёрненного пространства круга для свободного размещения образующихся стружек и других продуктов обработки, что снижает вероятность засаливания круга.

Например, на рисунке 4.5 штрихпунктирными линиями показаны значения параметров  $Q$  и  $q$  через 10 минут шлифования при работе алмазного круга в режиме затупления (наблюдалось засаливание круга), когда электрической энергии недостаточно для своевременного устранения с рабочей поверхности продуктов обработки и восстановления режущей способности круга.

При использовании источника постоянного тока процесс шлифования стабилизируется лишь при напряжении, превышающем 10 В. При меньшем напряжении через определённое время процесс шлифования прекращается в связи с интенсивным засаливанием алмазного круга.

При использовании генератора униполярных импульсов стабилизация процесса шлифования во времени наступала при  $I_{кз} > 20-30\text{А}$ .

Этим показано, что уменьшение безразмерного коэффициента  $\eta$  при увеличении количества подводимой в зону резания дополнительной электрической энергии связано с увеличением высот выступания зёрен над уровнем связки и повышением вероятности стабилизации процесса во времени (за счёт снижения интенсивности трения продуктов обработки со связкой и засаливания круга).

Следовательно, основным параметром процесса является острота зёрен, определяемая безразмерным коэффициентом  $\eta$ , а параметры, характеризующие высоту выступания зёрен над связкой, интенсивность трения круга с обрабатываемым материалом и другие могут рассматриваться как производные

безразмерного коэффициента  $\eta$ . Чем меньше  $\eta$ , тем выше режущая способность круга, меньше силы и температура резания, однако больше удельный расход алмаза. Исходя из этого, ограничивающим фактором уменьшения безразмерного коэффициента  $\eta$  следует рассматривать удельный расход алмаза  $q$ . Выбор оптимального значения  $\eta$  необходимо производить с учётом экономически обоснованного значения  $q$  или минимальной себестоимости обработки.

Обычно на практике об эффективности процесса шлифования судят по состоянию режущего рельефа круга. Более развитому режущему рельефу соответствует более высокая производительность обработки и т.д. Степень развитости рельефа оценивают остротой зёрен и высотой выступания их над уровнем связки. Как показано выше, между этими двумя параметрами существует чёткая связь. Чем меньше безразмерный коэффициент  $\eta$  для данного алмазного круга, тем больше должна быть величина  $b$ . Поэтому увязывать показатели обработки лишь с величиной  $b$  (как это принято в теории шлифования) не совсем корректно: важно, как величина  $b$  взаимосвязана с остротой зерен и толщиной среза (безразмерный коэффициент  $\eta$ ) в процессе шлифования.

В общем случае эффект шлифования обусловлен как уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta$ , так и увеличением величины  $b$ . В одних случаях (при шлифовании относительно хрупких материалов) условия протекания процесса определяются исключительно остротой режущих зёрен, характеризуемой безразмерным коэффициентом  $\eta$ . При шлифовании пластичных материалов (когда образуются длинные сливные стружки), наряду с обеспечением высокой остроты режущих зёрен, важно обеспечить свободное размещение стружек в межзёренном пространстве круга, исключить их налипание на рабочую поверхность и засаливание круга. В данном случае параметр  $b$  выполняет вспомогательную функцию, связанную со

стабилизацией показателей шлифования во времени, а основным параметром также является  $\eta$ . Для увеличения величины  $b$  необходимо увеличить прочность удержания зёрен в связке, что достигается применением алмазных кругов на высокопрочных металлических связках, работающих в режиме алмазно-искрового шлифования. При шлифовании алмазными кругами на органических связках за счёт уменьшения прочности удержания зёрен параметр  $b$  уменьшается. Это приводит к интенсивному трению связки с обрабатываемым материалом, уменьшению коэффициента  $\eta$  и увеличению удельного расхода алмаза. Возможности высокопроизводительного шлифования в этих условиях ограничены.

Для оценки влияния различных способов шлифования на обрабатываемость материалов были проведены экспериментальные исследования абразивного, алмазного и алмазно-искрового шлифования. Все эксперименты проводились при одинаковых механических режимах. Обработывались сталь ШХ15, твердый сплав ВК15 и магнитотвердый сплав ЮНДК24Т2.

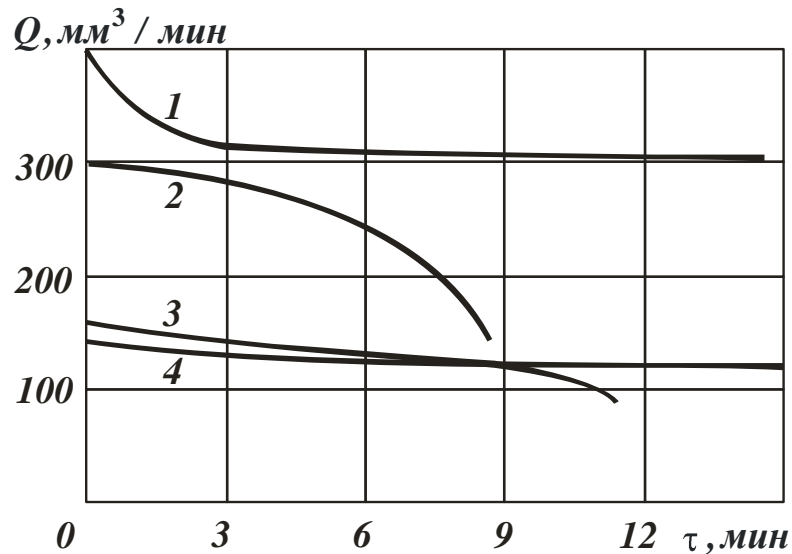
Необходимо отметить, что из-за крупнозернистой структуры, повышенной твердости (HRC 45-56), низкой механической прочности (28-84 Н/мм<sup>2</sup>), а также высокой хрупкости, механическая обработка магнитотвердого сплава ЮНДК24Т2 шлифованием затруднена.

Эксперименты проводились на модернизированном внутришлифовальном станке модели 3А227. В качестве источника технологического тока был использован выпрямитель ВАКГ 630/12.

На рисунке 4.7 приведены результаты экспериментальных исследований производительности обработки магнитотвердого сплава ЮНДК24Т2 для различных способов шлифования. Как видим, при шлифовании алмазным кругом 1А1 25х10х3 АС6 125/100 М2-01 4 без введения в зону резания электрической энергии производительность обработки с течением времени шлифования непрерывно уменьшается, происходит быстрая потеря режущей



способности круга из-за интенсивного засаливания его рабочей поверхности. Через 6-8 минут резание практически прекращается.



1 – АИШ ( $U=12$  В);

2 – обычное шлифование алмазным кругом на металлической связке М2-01;

3 – шлифование алмазным кругом на органической связке В2-01;

4 – шлифование абразивным кругом ЗБ40СМ1

Условия обработки:  $V_{кр} = 20$  м/с;  $V_{дет} = 50$  м/мин;  $S_{пр} = 3$  м/мин;  $S_{non} = 0,1$  мм/мин;

СОЖ – 3%-ный содовый раствор

Рис. 4.7. Зависимость производительности обработки  $Q$  от продолжительности шлифования  $\tau$  [223]

Введение в зону резания электрической энергии (при напряжении  $U=12$  В) позволяет стабильно поддерживать во времени производительность обработки. При этом производительность обработки в несколько раз больше производительности, достигаемой при обычном алмазном шлифовании (без тока).

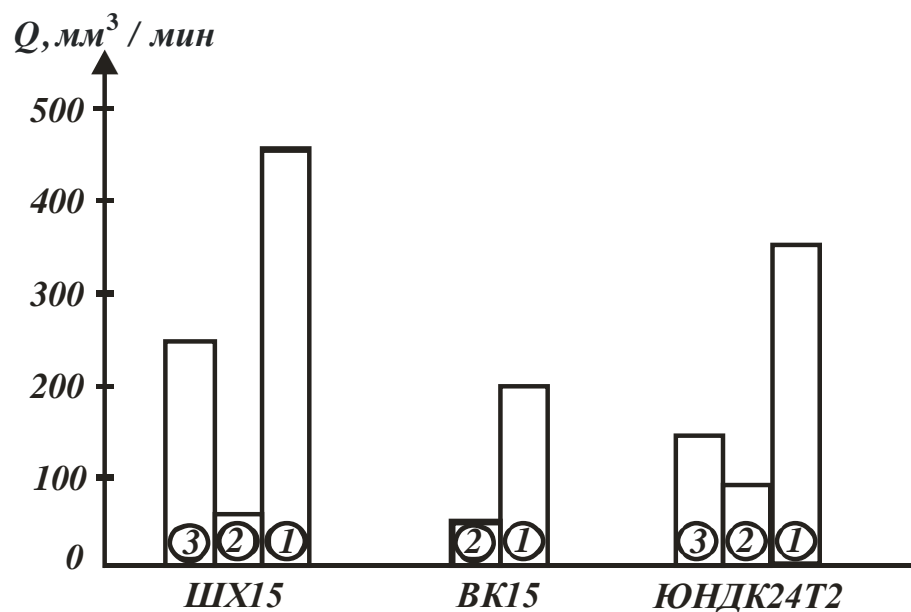
Шлифование алмазным кругом на органической связке В2-01 также характеризуется весьма низкой производительностью обработки и интенсивным износом круга.

Шлифование абразивным кругом ЗБ40СМ1 характеризуется низкой

производительностью обработки и чрезвычайно высоким износом круга.

Таким образом установлено, что введение в зону резания дополнительной электрической энергии в форме электрических разрядов позволяет интенсифицировать процесс шлифования. При обычном алмазном шлифовании, даже после предварительной электроэрозионной правки круга на металлической связке, происходит быстрая потеря его режущей способности.

На рисунке 4.8 приведены сравнительные диаграммы обрабатываемости стали ШХ15, твердого сплава ВК15 и магнитотвердого сплава ЮНДК24Т2. Во всех случаях наибольшая производительность обработки достигалась при АИШ. Шлифование алмазным кругом на органической связке В2-01 характеризуется наименьшей производительностью обработки, а обычное абразивное шлифование занимает промежуточное положение.



1 – АИШ (U=12 В);

2 – шлифование алмазным кругом на органической связке В2-01;

3 – шлифование абразивным кругом 3Б40СМ1.

Условия обработки:  $V_{кр} = 20$  м/с;  $V_{дет} = 50$  м/мин;  $S_{пр} = 3$  м/мин;

$S_{нон} = 0,1$  мм/мин; СОЖ – 3%-ный содовый раствор.

Рис. 4.8. Производительность  $Q$  различных способов шлифования [168]

Обрабатываемость магнитотвердого сплава ЮНДК24Т2 и особенно твердого сплава ВК15 уступает обрабатываемости стали ШХ15 по показателю достижимой стабильной производительности обработки. При этом производительность обычного шлифования алмазным кругом на органической связке В2-01 почти одинакова для всех рассматриваемых материалов.

В таблице 4.6 показано влияние скорости детали на производительность обработки при алмазно-искровом шлифовании твердых сплавов (ВК8, ВК15) и магнитотвердого сплава ЮНДК24Т2.

Таблица 4.6. Значения производительности обработки твердых сплавов и магнитотвердого сплава

Скорость детали, м/с	ВК8	ВК15	ЮНДК24Т2
0,5	180	115	55
3,0	205	150	80
Рост, %	13,9	30,4	45,5

Как следует из таблицы 4.6, увеличение скорости детали является важным фактором интенсификации внутреннего алмазно-искрового шлифования вольфрамкобальтовых твердых сплавов и магнитотвердого сплава ЮНДК24Т2.

Из проведенного анализа можно заключить, что из всех рассмотренных схем шлифования наиболее эффективно применение АИШ.

#### 4.4. Удельный расход алмаза при АИШ

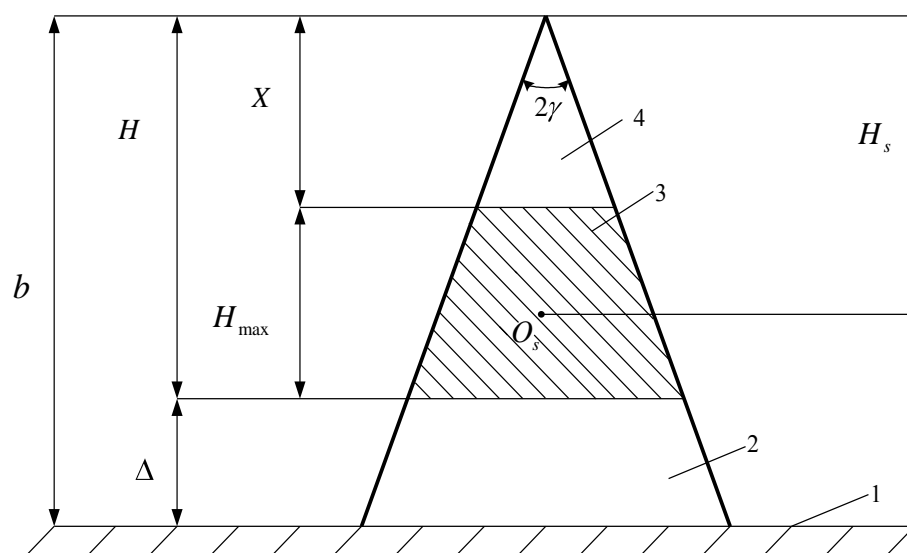
Борьба за ресурсосбережение вообще и в области энергетических и материально-технических ресурсов в частности со всей очевидностью и актуальностью будет оставаться лейтмотивом развития науки в современной цивилизации, то ли вопреки, то ли в согласии с инстинктом самосохранения

(авангардная роль реализации которого отведена именно науке), упрямо и, как правило, безоглядно увеличивающей свою численность, потребности и расходы.

Данный подраздел посвящен анализу некоторых аспектов ресурсосбережения в использовании инструментов комбинированных технологий шлифования, касающихся повышения эффективности использования сверхтвердых абразивов и рационального энергопотребления на нужды поддержки работоспособности металлосвязанных режущих инструментов технологий АИШ.

Выполненное исследование преследует цель аналитического дополнения современных подходов к изучаемым вопросам, формируемым на основе физико-математической теории процессов обработки материалов и технологии машиностроения [124, 125, 175].

Рассмотрим схему [211] критического (приводящего к выпадению) нагружения наиболее выступающего над уровнем связки режущего зерна, (рис. 4.9).



1 – связка, 2 – зерно, 3 – сечение среза, 4 – изношенная часть зерна,  
 $O_s$  – геометрический центр тяжести сечения

Рис. 4.9. Расчетная схема критического нагружения зерна

Опрокидывающий зерно момент силы  $M_p$ , как результат действия в сечении среза напряжений резания, в соответствии с рассматриваемой схемой представим формулой вида

$$M_p = \sigma_{\text{усл}} \cdot S(b - H_s), \quad (4.9)$$

где  $\sigma_{\text{усл}}$  – условное напряжение резания (в трактовке [275]),  $H/m^2$ ;  $b$  – максимальная высота выступания зерна над уровнем связки в системе отсчета от вершины неизношенного зерна,  $m$ ;  $H_s$  – расстояние от вершины неизношенного зерна до условной точки приложения опрокидывающей силы (геометрического центра тяжести сечения среза),  $m$ ;  $S$  – площадь максимального поперечного сечения среза,  $m^2$ ;

$$S = (H^2 - X^2) \cdot \text{tg } \gamma, \quad (4.10)$$

где  $H$  – максимальная глубина внедрения снимаемого припуска обрабатываемой заготовки в рабочую поверхность круга в системе отсчета от вершины максимально выступающего и притом неизношенного зерна,  $m$ ;  $X$  – максимальная величина линейного износа зерна,  $m$ ;  $2\gamma$  – угол при вершине главного (максимального) продольного сечения зерна в версии моделирования его конусом,  $\text{rad}$ .

Из баланса частей площади сечения среза над и под уровнем  $H_s$  следует

$$H_s = \sqrt{\frac{H^2 + X^2}{2}}. \quad (4.11)$$

Тогда (4.9) после подстановок (4.10), (4.11) и  $b = H + \Delta$  (рис. 4.9) приобретает вид

$$M_p = \sigma_{\text{усл}} (H^2 - X^2) \left( H + \Delta - \sqrt{\frac{H^2 + X^2}{2}} \right) \cdot \text{tg } \gamma. \quad (4.12)$$

С введением параметра  $\eta$  (2.6), согласно расчетной схеме по рисунку 4.9

$$\eta = \frac{X}{H}, \quad (4.13)$$

характеризующего условия протекания процесса шлифования и регламентирующего его стабилизацию в соответствии с отношением скоростей износа зерен  $V_{зеп}$  и связки  $V_{св}$  вида (2.26),  $\frac{V_{зеп}}{V_{св}} = \eta$ , из (4.12) получаем

$$M_p = \sigma_{ycl} H^3 (1 - \eta^2) \left( 1 + \frac{\Delta}{H} - \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{1 + \eta^2} \right) \operatorname{tg} \gamma. \quad (4.14)$$

Из первой производной функции (4.14) по параметру  $\eta$

$$M_{p\eta}' = \frac{\sigma_{ycl} H^3 \eta \operatorname{tg} \gamma}{2\sqrt{1 + \eta^2}} \left[ 3\sqrt{2} \eta^2 - 4\left(1 + \frac{\Delta}{H}\right) \sqrt{1 + \eta^2} + \sqrt{2} \right] \quad (4.15)$$

непосредственно следует ее нулевое значение при  $\eta = 0$ , т.е. в нижнем пределе существования функции (4.13), причем вторая производная

$$M_{p\eta}'' = \frac{\sigma_{ycl} \cdot H^3 \cdot \operatorname{tg} \gamma}{(1 + \eta^2)^{\frac{3}{2}}} \left[ 6\sqrt{2} \eta^4 + 11\sqrt{2} \eta^2 + \sqrt{2} - 4\left(1 + \frac{\Delta}{H}\right) (3\eta^2 + 1) \sqrt{1 + \eta^2} \right] \quad (4.16)$$

при  $\eta = 0$  отрицательна, что свидетельствует о достижении функцией  $M_p = M_p(\eta)$  максимума в нижней границе области определения параметра  $\eta$ , как это априорно аналитическим выкладкам и следовало ожидать при некотором неизменном значении  $\sigma_{ycl}$  уже из графической интерпретации расчетного подхода (рис. 4.9) при фиксированных значениях  $H$ ,  $\Delta$  и  $\gamma$ .

Физический смысл этого результата в рассматриваемой задаче состоит в том, что уменьшение максимальной толщины среза  $H_{\max}$  (рис. 4.9), приходящейся на наиболее выступающее зерно режущего рельефа круга в некоторой системе вероятностных в реальном процессе параметров  $H$  и  $\Delta$ , снижает вероятность вываливания работающих зерен из связки круга. Снижение  $H_{\max}$  в условиях постоянства  $H$  сопровождается более полным

использованием абразивного потенциала режущего зерна увеличением его износа  $X$  до наработки на отказ, чему соответствует увеличение коэффициента  $\eta$  (4.13). Выполнением адекватного увеличению  $\eta$  понижения  $V_{ce}$  (2.26) обеспечивается повышение эксплуатационного ресурса инструмента и снижение интенсивности прямых затрат на него.

Подтверждением перспективности развития этого научного подхода в разработке и использовании технологических систем обработки алмазно-абразивными инструментами с управляемым понижением уровня связки является опыт реализации технологических решений двойного скоростного шлифования, отличительной физико-геометрической особенностью статистик стружкообразования которых являются удлиненные тонкие единичные срезы [276, 106].

С другой стороны, в верхнем пределе существования функции (4.13), т.е. при  $\eta \rightarrow 1$   $X \rightarrow H$ , как это следует из графической интерпретации расчетного подхода (рис. 4.9), при  $\Delta \rightarrow 0$  функция  $M_p = M_p(\eta)$  стремится к абсолютному минимуму ( $M_p \rightarrow 0$ ).

Из рассмотрения соответствующих пределов по (4.15) и (4.16) получаем

$$\lim_{\substack{\eta \rightarrow 1 \\ \Delta \rightarrow 0}} M_{p\eta}' = 0$$

и

$$\lim_{\substack{\eta \rightarrow 1 \\ \Delta \rightarrow 0}} M_{p\eta}'' = \sqrt{2} \sigma_{ycl} H^3 tg \gamma > 0.$$

Физический смысл этого предельного результата, когда линейный износ зерен значителен ( $X \rightarrow H$ ), а сьем припуска практически отсутствует ( $H_{max} \rightarrow 0$ ) и, соответственно, нет нужды в дополнительном пространстве для текущего размещения продуктов режущего контакта ( $\Delta \rightarrow 0$ ), состоит в том,

что инструмент или вовсе не имеет превосходства в твердости перед обрабатываемой заготовкой, или это превосходство не является существенным (например, обработка сверхтвердых материалов сверхтвердыми же абразивами).

Предположим далее, что в основу проектирования некоторой технологической операции шлифования положены принцип рациональной стабильности и критерий минимизации удельного расхода обрабатываемого материала (шлифпорошка).

Как показано предшествующими исследованиями [125], минимум удельного расхода материала зерен при решении сформулированной выше задачи достигается при  $\eta_0 = 0,5$ . Проследим, как несоблюдение этого условия с увеличением  $V_{св}$  и, соответственно, с уменьшением  $\eta$  согласно (2.26) скажется на изменении (увеличении) момента опрокидывания зерна  $M_p$  (4.14).

Относительные оценки изменения  $\eta$  и  $M_p$ , в этом случае норма  $\eta = 0,5$  соответственно  $\delta\eta_0 = \eta - 0,5 / 0,5$  и

$\delta M_{p0} = \delta M_0 = M_p /_{\eta \neq \eta_0} - M_p /_{\eta = \eta_0} / M_{p\eta = \eta_0}$ , описываются выражениями

$$\delta\eta_0 = 2\eta - 1, \quad (4.17)$$

$$\delta M_0 = \frac{4}{3} \cdot \frac{1 - \eta^2 \left( \frac{\Delta}{H} + 1 - \sqrt{\frac{1 + \eta^2}{2}} \right)}{\frac{\Delta}{H} + 1 - \sqrt{0,625}} - 1. \quad (4.18)$$

На рисунке 4.10 в интервале  $(0, 1/4)$  поливариантов отношения  $\Delta/H$  показаны области семейств кривых  $|\delta M_0| = |\delta M_0| |\delta\eta_0|$ , причем значения  $\delta M_0$  положительны при отрицательных изменениях  $\delta\eta_0$ , т.е. при отклонении  $\eta$  от значения  $\eta_0 = 0,5$  в область  $\eta < 0,5$ , и наоборот, как это следует из расчетной схемы (рис. 4.9) и аналитических описаний (4.17), (4.18).



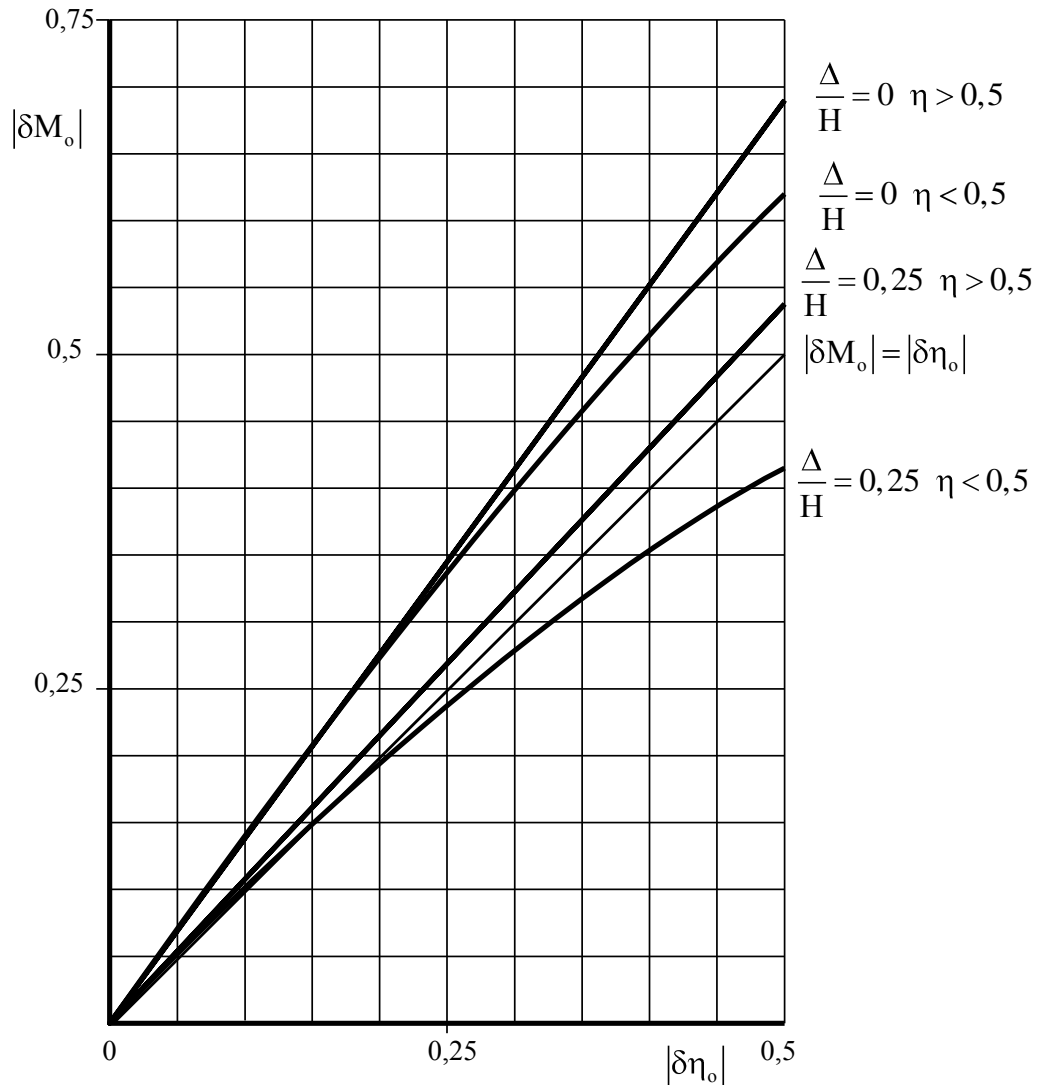


Рис. 4.10. Области семейств кривых  $|\delta M_0| = |\delta M_0| |\delta \eta_0|$  в интервале  $(0, 1/4)$  изменения  $\Delta/H$   $\eta_0 = 1/2$

Характер кривых  $\delta M_0 = \delta M_0 \delta \eta_0$  при  $\eta < 0$  свидетельствует не только о росте  $M_p$  с уменьшением степени изнашивания зерна до его выпадения из связки в системе фиксированных параметров  $b$  и  $H$ , что очевидно (рис. 4.9), но и об опережающем росте  $|\delta M_0| = \delta M_0$  по сравнению с  $|\delta \eta_0| = -\delta \eta_0$ , когда  $|\delta M_0| > |\delta \eta_0|$  в некоторой минус-окрестности  $\eta_0$ , с пределом-максимумом  $\delta M_0$  в рассматриваемой конусообразной модельной интерпретации зерна около значения  $\delta M_0 = 0,865$  при  $\frac{\Delta}{H} = 0$  и  $\delta \eta_0 = -1$ , рисунок 4.11.

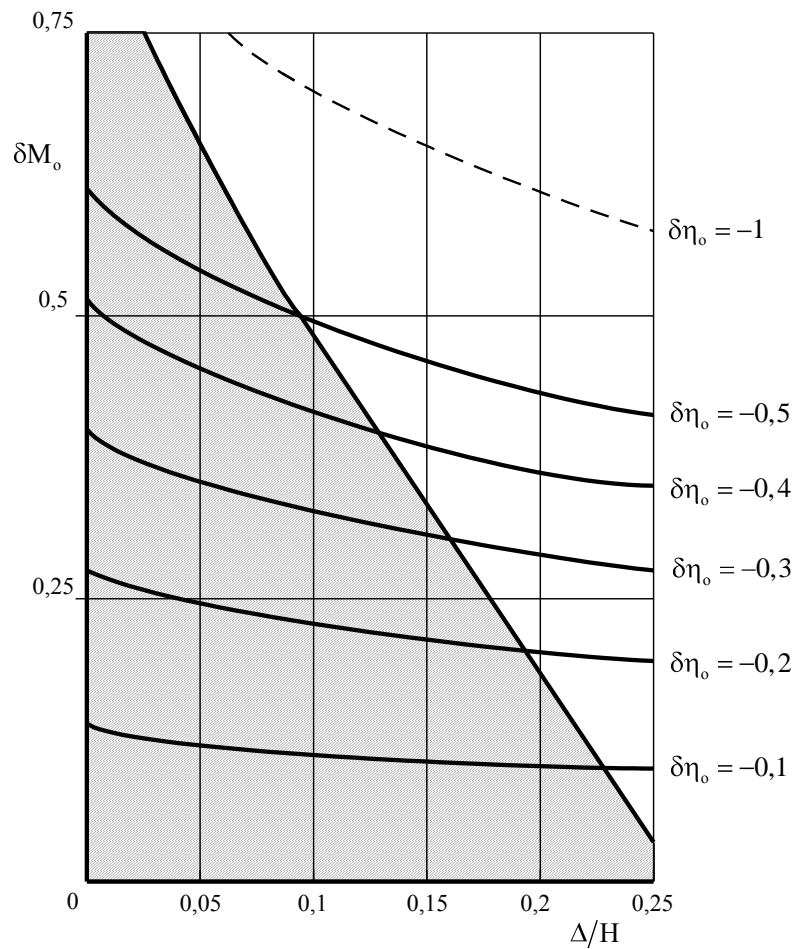


Рис. 4.11. Семейство кривых  $\delta M_0 = \delta M_0 \Delta/H$  в интервале  $-1,0$  изменения  $\delta \eta_0$ , соответствующем интервалу  $(0, 1/2)$  изменения  $\eta$  ( $\eta_0 = 1/2$ ); заштрихована область  $|\delta M_0| > |\delta \eta_0|$

Граничные значения параметра  $\eta$ , когда дальнейшее уменьшение затупления наиболее выступающего зерна изменяет опережение роста  $\delta M_0$  по сравнению с ростом  $\delta \eta_0$  в абсолютном выражении на отставание ( $\delta M_0 < |\delta \eta_0|$ ), являются решениями системы уравнений (4.17) и (4.18), рассматриваемых как совместная система при условии  $\delta M_0 = -\delta \eta_0$ . После соответствующего разрешения этой системы уравнений относительно  $\Delta/H$  имеем:

$$\frac{\Delta}{H} = \frac{2(1-\eta)\left(-3(4-\sqrt{10})+4(1+\eta)\left(2-\sqrt{2(1+\eta^2)}\right)\right)}{(4\eta-3-\sqrt{5})(4\eta-3+\sqrt{5})}. \quad (4.19)$$

С учётом на практике вероятностного характера  $\eta$  и  $M_p$  в момент выпадения из связки каждого из зерен рабочей поверхности шлифовального круга (и притом не все зерна в этот момент оказываются наиболее выступающими, что предопределяется уже диапазоном зернистости шлифпорошка на проектной стадии жизненного цикла круга), приведенные выше результаты и обобщения следует рассматривать прежде всего как характеристику некоторых тенденций, присущих реальным процессам шлифования, в том числе в системе использованных выше относительных численных оценок  $\delta M_0$  и  $\delta \eta_0$ , на практике также вероятностных.

Проведенный анализ ориентирован на рациональное использование инструмента в реальных технологиях, подобная схема исследования может быть использована и в аналитических приближениях к высокопроизводительным технологиям, когда норма  $\eta$  может превышать  $\eta_0 = 0,5$ , и, наоборот, в ситуациях  $\eta < \eta_0$ , когда требуется решать задачи формирования сглаженного микрорельефа шлифуемой поверхности [188, 277].

Полученные результаты и обобщения адекватны известным экспериментальным данным алмазно-искрового шлифования, когда интенсификация электроэрозионного воздействия на связку круга в процессах заданной производительности приводит к повышенному удельному расходу сверхтвердого абразива вследствие повышенного износа связки. При этом провоцируется рост  $b$  (рис. 4.9), что приближает критическое значение  $M_p$  во времени работы каждого зерна, уменьшает его результирующий износ  $H$  (и относительную оценку  $\eta$ ), дополнительно увеличивая  $\delta M_p = \delta M_p \delta \eta$

против значений, рассчитанных в рамках рассмотренной выше расчетной схемы (см. подраздел 2.2) при условии постоянства  $b$  [211].

К чему это приводит на практике, можно проследить, например, по экспериментальным данным [166], основное содержание которых приведено в таблице и дополнено характеристикой  $\delta\eta$ , в каждой совокупности вариантов в первом приближении полагая нормой  $\eta$  значение, соответствующее минимуму удельного расхода алмазов  $q_{V_0}$ .

Для расчётов  $\delta\eta_0$  по известной величине  $\delta q_v$  сначала обратимся к зависимости (2.26). Учитывая используемое расчётной схемой допущение постоянства  $V_{зер}$ , имеем:

$$\delta\eta_0 = \delta V_{св} = \frac{V_{св0} - V_{св}}{V_{св}}. \quad (4.20)$$

Далее последовательно зафиксируем:

$$V_{св} = \frac{V_k}{S_k}, \quad (4.21)$$

где  $V_k$  и  $S_k$  – соответственно объемная скорость износа ( $V_k, м^3/с$ ) и номинальная площадь рабочей поверхности ( $S_k, м^2$ ) алмазосодержащей композиции;

$$V_k = V_a / K, \quad (4.22)$$

где  $V_a$  и  $K$  – соответственно скорость объемного расхода ( $V_a, м^3/с$ ) и концентрация ( $K$ , в объемных долях) алмазов;

$$V_a = q_a Q, \quad (4.23)$$

где  $Q$  – фактическая производительность шлифования,  $м^3/с$ ;  $q_a$  – относительный объемный расход алмазов,  $м^3$  (алмазов)/  $м^3$  (сошлифованного материала);

$$q_a = q_v / \rho_a, \quad (4.24)$$

где  $q_V$  и  $\rho_a$  – соответственно удельный расход ( $q_V$ , кг/м<sup>3</sup>) и плотность ( $\rho_a$ , кг/м<sup>3</sup>) алмазов.

Подстановкой (4.24) в (4.23) и использованием полученного результата при подстановке (4.22) в (4.21) получаем:

$$V_{cv} = \frac{q_V Q}{\rho_a K S_k} . \quad (4.25)$$

Основываясь на (4.25), преобразуем (4.20) в вид, удобный для расчетов  $\delta\eta_0$  с прямым использованием данных [166]:

$$\delta\eta_0 = \delta q_V = \frac{q_{V_0} - q_V}{q_V} . \quad (4.26)$$

При этом следует заметить, что поскольку в (4.25) входит произведение  $q_V Q$  (полагая оперирование фактическими значениями  $q_V = q_{V_{факт}}$  и  $Q = Q_{факт}$ ), то в расчётах возможно использование номинального значения  $Q_{ном}$ , но при условии приведения и значения  $q_V$  к номинальной (режимной)

производительности  $\left( q_{V_{ном}} = q_V \frac{Q}{Q_{ном}} \right)$ . Следует заметить также, что

использование (4.25) в расчётах  $V_{cv}$  ориентировано на обращение к данным уже состоявшихся прошлых экспериментов, когда фиксируемая в ходе их проведения информация о времени  $\tau$  протекания рабочего процесса с заданной режимной (номинальной) производительностью и данные контроля изменения толщины алмазоносного слоя  $\delta S$  могут и не сохраниться, иначе задача определения  $V_{cv}$  решается прямым расчётом:

$$V_{cv} = \delta S / \tau . \quad (4.27)$$

Таблица 4.7. Изменение расхода и относительного затупления алмазов с увеличением среднего значения импульсного тока при АИШ

Обрабатываемый материал	Вид шлифования (модель станка)	Источник Технологического тока	Алмазный круг	Расчётная производительность $Q, \text{мм}^3/\text{мин}$	Импульсный ток $I_{\text{ф}}, \text{А}$	Удельный расход алмазов $q_v, \text{мг}/\text{см}^3$	Относительная оценка изменения относительного затупления алмазов $\delta\eta$
Теплостойкая наплавка 3Х2В8	Круглое наружное (ЗБ12, модернизация)	Промышленный блок электропитания для электроэрозионного шлифования (ИТТ-35)	1А1 200x10x5x76 АС6 250/200 4 М2-01	160 0	8	21,0	0
					11	21,5	-0,02
Твёрдый сплав ВК6	Круглое наружное (ЗБ12, модернизация)	Промышленный генератор униполярных импульсов (ВГ-3В)	1А1 250x10x5x76 АС6 250/200 4 М2-01	200 0	4	19,2	0
					8	28,1	-0,32
					12	63,6	-0,70
Магнитно-твёрдый сплав ЮНДК24Т2	Внутреннее (ЗК227ВР)	Промышленный генератор униполярных импульсов (ВГ-3В)	1А1 25x10x3x6 АС6 125/100 4 М2-01	400	30	21,8	0
					35	25,3	-0,14
					40	33,7	-0,35

Оценивая приведенные в таблице результаты, следует сделать ремарку относительно варианта обработки твердого сплава ВК6: очевидно, что

увеличение импульсного тока до величины  $I_{cp} = 12A$  в конкретных кинематико-геометрических условиях шлифования (механические режимы резания – см. [166]) приводит к столь интенсивному изнашиванию связки, что часть зерен рабочей поверхности круга вообще не успевает осуществить микрорезание до выпадения из связки. Из приведенных результатов в целом следует, столь велика роль корректного управления скоростью износа связки (соблюдение нормы  $\eta$ ).

Проведем более детальный анализ изменения удельного расхода алмаза  $q$ . Для этого аналитическую зависимость (3.9) для случая  $\eta < 0,8$  с учетом зависимости (4.1) с определенными допущениями (в первом приближении) представим в виде:

$$q = \frac{M}{Q} \cdot \frac{\sqrt{1-\eta}}{\eta^3} = \frac{M}{Q} \cdot \left( \frac{H_0}{x} \right)^3. \quad (4.28)$$

Для заданных значений  $M$ ,  $Q$  и  $H_0$  удельный расход алмаза  $q$  уменьшается с увеличением величины линейного износа зерна  $x$ , т.е. более сглаженному режущему рельефу алмазного круга соответствует меньший удельный расход алмаза  $q$ .

С учетом зависимостей  $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$  и

$$H_0 = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр}}} \quad (4.29)$$

зависимость (4.28) примет вид

$$q = \frac{M}{B} \cdot \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3}{m \cdot V_{кр} \cdot x^3} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}}. \quad (4.30)$$

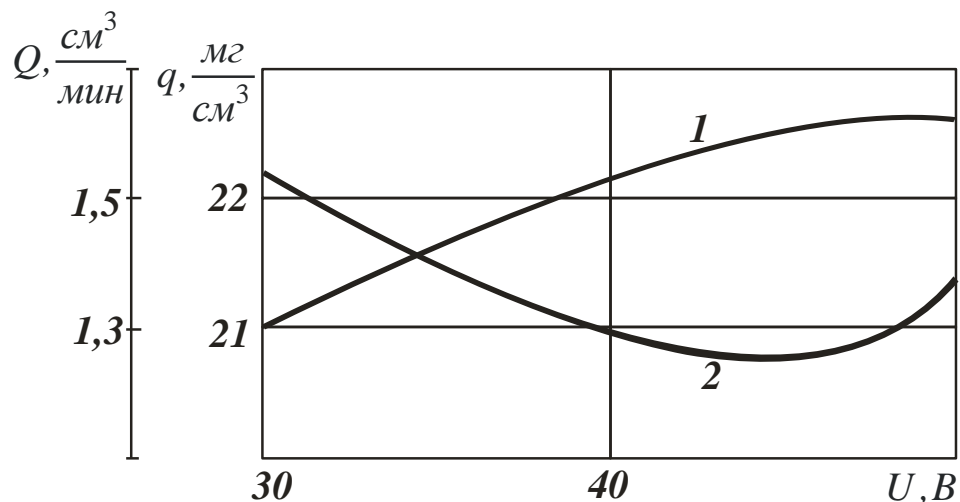
Как следует из зависимости (4.30), при заданном значении величины линейного износа зерна  $x$  удельный расход алмаза  $q$  тем меньше, чем больше параметры  $B$ ,  $V_{кр}$  и  $t$ . Скорость детали  $V_{дет}$  не влияет на удельный расход

алмаза  $q$ .

Наибольшее влияние на удельный расход алмаза  $q$  оказывает величина линейного износа зерна  $x$ . Это подтверждает выдвинутую в работе научную предпосылку об эффективности управления процессом шлифования за счет изменения величины  $x$ .

Для экспериментальной проверки теоретического решения получены и изучены зависимости удельного расхода алмаза  $q$  и производительности обработки  $Q$  от напряжения  $U$  технологического тока при круглом наружном АИШ наплавочного материала, рисунок 4.12. В качестве источника тока использовался ИТТ-35.

Как следует из рисунка 4.12, с увеличением напряжения  $U$  удельный расход алмаза  $q$  первоначально уменьшается, затем увеличивается, проходя точку минимума. Производительность обработки  $Q$  с увеличением напряжения  $U$  непрерывно увеличивается.



$$1 - Q = Q(U); \quad 2 - q = q(U)$$

Рис. 4.12. Зависимости производительности обработки  $Q$  и удельного расхода алмаза  $q$  от напряжения  $U$  технологического тока.

Произведение параметров  $q \cdot Q$  с увеличением напряжения  $U$  увеличивается (табл. 4.8). Это свидетельствует об увеличении скорости износа



связки алмазного круга  $V_{св}$  и уменьшении безразмерного коэффициента  $\eta$ .

Таблица 4.8. Значения произведения параметров  $q \cdot Q$

$U, В$	30	40	50
$q \cdot Q, \frac{мг}{см^3} \cdot \frac{см^3}{мин}$	28,9	32,4	34,9

Рассмотрим характер изменения удельного расхода алмаза  $q$ , исходя из зависимости (4.28). Увеличение производительности обработки  $Q$  (в связи с увеличением напряжения  $U$ ) ведет к уменьшению удельного расхода алмаза  $q$ . Однако такая закономерность справедлива до определенного значения производительности обработки  $Q$ , после чего удельный расход алмаза  $q$  увеличивается. Увеличение  $q$  связано с уменьшением величины линейного износа зерна  $x$  в зависимости (4.28).

С физической точки зрения уменьшение величины  $x$  с увеличением производительности обработки  $Q$  обусловлено существованием предельной силы резания, действующей на отдельное зерно круга, при которой зерно объемно разрушается и выпадает из связки круга или выпадает из связки без разрушения (в зависимости от механизма износа круга).

Тангенциальная составляющая силы резания  $P_{z1}$ , действующая на отдельное зерно круга, равна

$$P_{z1} = S \cdot \sigma, \quad (4.31)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения среза отдельным зерном,  $м^2$ ;  $\sigma$  – условное напряжение резания,  $Н/м^2$ .

Очевидно, с увеличением производительности обработки  $Q$  параметр  $S$  увеличивается. При условии  $P_{z1} = const$  это ведет к уменьшению условного напряжения резания  $\sigma$ , в соответствии с зависимостью (4.31).

В свою очередь, уменьшение  $\sigma$  возможно при резании более острым зерном, т.е. характеризующемся меньшей величиной линейного износа зерна  $x$ . Этим показано, что увеличение производительности обработки  $Q$  происходит в результате уменьшения величины  $x$ . Это, согласно зависимости (4.30), сопровождается увеличением удельного расхода алмаза  $q$ .

Таким образом установлено, что экстремальный характер изменения удельного расхода алмаза  $q$  от напряжения  $U$  обусловлен противоположным изменением параметров  $Q$  и  $x$ . С увеличением напряжения  $U$  производительность обработки  $Q$  увеличивается, а величина линейного износа зерна  $x$  до момента его объемного разрушения или выпадения из связки без разрушения уменьшается. За счет увеличения производительности обработки  $Q$  это ведет к уменьшению удельного расхода алмаза  $q$ , а за счет уменьшения величины  $x$  – к увеличению  $q$  в соответствии с зависимостью (4.30).

Экстремальное значение величины  $x$  можно установить, используя зависимость (3.9) и экспериментальное значение минимума удельного расхода алмаза  $q$ .

Обратимся к условному разделению максимальной высоты выступания зерен над уровнем связки круга  $b$  на две части:  $H$  и  $\Delta$ , рисунок 4.9:

$$b = H + \Delta, \quad (4.32)$$

где  $H$  – условная максимальная глубина внедрения зерна в обрабатываемый материал, определяется зависимостями (2.33) и (2.41);  $\Delta$  – высота межзеренного пространства круга, занимаемая стружками и другими продуктами обработки,  $m$ , определяется зависимостью:  $\Delta = \xi \cdot \Delta_0$ ;  $\xi$  – коэффициент, учитывающий степень заполнения стружкой межзеренного пространства круга ( $\xi > 1$ );  $\Delta_0 = \frac{S_{мгн}}{B} = \frac{Q}{V_{кр} \cdot B} = \frac{B \cdot V_{дет} \cdot t}{V_{кр} \cdot B} = \frac{V_{дет} \cdot t}{V_{кр}}$  – толщина условного слоя “расплавленного” обрабатываемого материала, который образуется за одно вращение круга,  $m$ ;  $S_{мгн}$  – мгновенная суммарная площадь

среза всеми одновременно работающими зернами круга,  $m^2$ ;  $B$  – ширина круга,  $m$ ;  $Q$  – производительность обработки,  $m^3/c$ ;  $V_{дет}$ ,  $V_{кр}$  – соответственно скорости детали и круга при круглом наружном (плоском) шлифовании,  $m/c$ ;  $t$  – глубина шлифования,  $m$ .

После преобразований уравнение (4.32) примет вид:

$$b = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta^2)}} + \frac{V_{дет} \cdot t}{V_{кр}} \cdot \xi \quad (4.33)$$

или

$$b = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot Q}{m \cdot V_{кр} \cdot B \cdot (1 - \eta^2)}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} + \frac{Q}{V_{кр} \cdot B} \cdot \xi \quad (4.34)$$

Проведем анализ удельного расхода алмаза  $q$  с учетом изменения безразмерного коэффициента  $\eta$ , определяемого из уравнения (4.34). Для этого разрешим уравнение (4.34) относительно  $\eta$ , принимая для упрощения расчетов приближенную зависимость:  $(1 - \eta^2) \approx (1 - \eta)$ , тогда

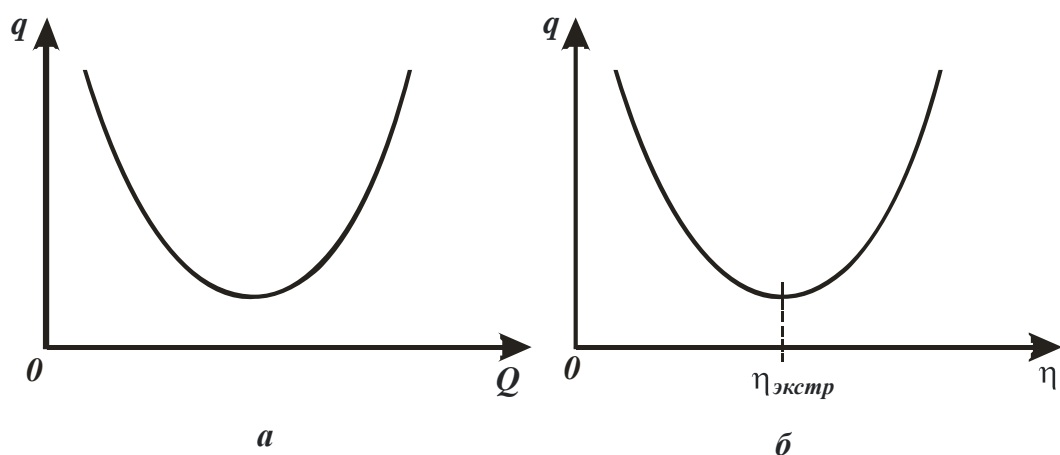
$$\eta = 1 - \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot Q}{m \cdot V_{кр} \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} \cdot \frac{1}{\left(b - \frac{Q \cdot \xi}{V_{кр} \cdot B}\right)^3} \quad (4.35)$$

Как следует из зависимости (4.35), с увеличением производительности обработки  $Q$  безразмерный коэффициент  $\eta$  уменьшается. Таким образом, получена аналитическая зависимость, в явном виде связывающая производительность обработки  $Q$  и безразмерный коэффициент  $\eta$ .

Подставим полученную зависимость (4.35) в зависимость (4.28):

$$q = \frac{M}{\sqrt{Q}} \cdot \sqrt{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3}{m \cdot V_{кр} \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} \cdot \frac{1}{\left(b - \frac{Q \cdot \xi}{V_{кр} \cdot B}\right)^3}} \times \left[ \frac{1}{1 - \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot Q}{m \cdot V_{кр} \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} \cdot \frac{1}{\left(b - \frac{Q \cdot \xi}{V_{кр} \cdot B}\right)^3}} \right]^3 \quad (4.36)$$

Как видим, производительность обработки  $Q$  неоднозначно влияет на удельный расход алмаза  $q$ . Первоначально с увеличением  $Q$  удельный расход алмаза  $q$  уменьшается, затем – увеличивается, проходя точку минимума, рисунок 4.13. На наличие оптимума (минимума) относительного расхода алмаза с возрастанием скорости изделия (производительности) при круглом продольном шлифовании по результатам выполненных в Харьковском политехническом институте указывалось и ранее [278]. Это хорошо согласуется с приведенными выше результатами теоретических и экспериментальных исследований удельного расхода алмаза  $q$ .



$a - q = q(Q); \quad б - q = q(\eta)$

Рис. 4.13. Характер зависимостей удельного расхода алмаза  $q$  от производительности обработки  $Q$  и безразмерного коэффициента  $\eta$

Проведем анализ зависимости (3.6) для определения удельного расхода алмаза  $q$  с учетом зависимости (4.35). Для этого подставим зависимость (4.35) в (3.6):

$$q = \frac{\rho_a}{\rho_m} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кр} \cdot B \cdot \alpha}{Q} \cdot \frac{V_{зер}}{\left[ 1 - \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot Q}{m \cdot V_{кр} \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} \cdot \frac{1}{\left( b - \frac{Q \cdot \xi}{V_{кр} \cdot B} \right)^3} \right]} \quad (4.37)$$

Как и по зависимости (4.36), с увеличением производительности обработки  $Q$  удельный расход алмаза  $q$  первоначально уменьшается, затем увеличивается, проходя точку минимума. Это свидетельствует об одинаковом характере изменения удельного расхода алмаза  $q$  по зависимостям (4.36) и (4.37).

Проведем исследование функции удельного расхода алмаза  $q$  на экстремум. Для этого упростим зависимость (4.35), принимая в первом приближении  $\left( b - \frac{Q \cdot \xi}{V_{кр} \cdot B} \right) \approx b$ . Тогда зависимость (4.35), разрешенная относительно производительности обработки  $Q$ , примет вид

$$Q = \frac{m \cdot V_{кр} \cdot B \cdot b^3 \cdot (1 - \eta)}{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3} \cdot \sqrt{\frac{t}{\rho}} \quad (4.38)$$

Определим удельный расход алмаза  $q$ , для чего подставим зависимость (4.38) в зависимость (3.6)

$$q = \frac{\rho_a}{\rho_m} \cdot \frac{630 \cdot \pi^2 \cdot \bar{X}^3 \cdot D_{кр} \cdot \alpha \cdot V_{зер}}{m \cdot V_{кр} \cdot b^3} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} \cdot \frac{1}{\eta \cdot (1 - \eta)} \quad (4.39)$$

Как следует из зависимости (4.39), с увеличением безразмерного коэффициента  $\eta$  удельный расход алмаза  $q$  проходит точку экстремума. Для

определения экстремального значения  $\eta_{\text{экстр}}$  продифференцируем функцию  $q$  по безразмерному коэффициенту  $\eta$  и полученное выражение приравняем к нулю:

$$q'_\eta = \frac{-(1-2\eta)}{\eta^2 \cdot (1-\eta)^2} = 0,$$

откуда

$$\eta_{\text{экстр}} = 0,5. \quad (4.40)$$

Таким образом аналогично [125] установлено, что в точке экстремума функции  $q$  безразмерный коэффициент  $\eta$  принимает значение 0,5. Подставляя в зависимость (4.38) это значение, можно определить экстремальное значение производительности обработки  $Q$ .

Докажем, что в точке экстремума функция  $q$  принимает минимальное (а не максимальное) значение. Для этого возьмем вторую производную от функции  $q$  по безразмерному коэффициенту  $\eta$ :

$$q''_\eta = \frac{\eta \cdot (1-\eta) + (1-2\eta) \cdot (1-\eta) - (1-2\eta) \cdot \eta}{\eta^4 \cdot (1-\eta)^4}. \quad (4.41)$$

Подставляя в зависимость (4.41) экстремальное значение безразмерного коэффициента  $\eta_{\text{экстр}} = 0,5$ , видим, что  $q''_\eta$  принимает положительное значение. Следовательно, в точке экстремума удельный расход алмаза  $q$  принимает минимальное значение, что и требовалось доказать.

С позиций логистики рассматриваемого здесь удельного расхода алмаза при АИШ вернемся к физической сущности реализации равномерного во времени износа алмазного круга и вновь обратимся к расчетной схеме по рисунку 2.6.

Пусть связка круга с течением времени обработки изнашивается со скоростью  $V_{\text{св}}$ . Это может быть обусловлено работой круга в режиме

самозатачивания или за счет применения непрерывной механической, электроэрозионной (АИШ) или, например, электрохимической правки алмазного круга. Тогда, для выполнения условия равномерного во времени износа круга величина  $(b - H)$  должна оставаться постоянной. Это будет достигаться в том случае, если каждая точка уровня  $H$ , определяющая максимальную глубину внедрения обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга, будет перемещаться в вертикальном направлении с постоянной скоростью  $V_{св}$ , а параметры  $x$ ,  $H$  и  $b$  будут оставаться постоянными с течением времени обработки.

Скорость движения обрабатываемого прямолинейного образца по нормали к рабочей поверхности круга при этом будет равна  $(V'_{дет} + V_{св})$ .

Тогда время контакта режущего зерна с обрабатываемым материалом до момента его выпадения из связки круга определится:

$$\tau_{св} = \frac{H}{V_{св}}. \quad (4.42)$$

За это время режущее зерно изнашивается на величину  $x$ , т.е. время износа зерна равно

$$\tau_{зер} = \frac{x}{V_{зер}}, \quad (4.43)$$

где  $V_{зер}$  – средняя скорость износа зерна круга, м/с.

Из условия  $\tau_{св} = \tau_{зер}$  по (4.42) и (4.43) получим:

$$V_{св} = V_{зер} \cdot \frac{H}{x} = \frac{V_{зер}}{\eta},$$

Откуда приходим к зависимости (2.26)

В теории шлифования (см. подраздел 2.2) принято считать, что условием стабилизации во времени процесса шлифования является равенство скоростей износа зерен и связки круга  $V_{св} = V_{зер}$ . В действительности, как следует из зависимости (2.26), стабилизировать процесс шлифования можно при условии

$V_{св} > V_{зер}$  ( $0 < \eta < 1$ ). При условии  $V_{св} = V_{зер}$  ( $\eta = 1$ ) процесс резания при шлифовании неосуществим. Исключением является лишь процесс шлифования синтетических сверхтвердых материалов, когда практически отсутствует внедрение зерен алмазного круга в обрабатываемый материал и  $x \rightarrow H$ , т.е.  $\eta \rightarrow 1$ .

Необходимо отметить, что скорость износа зерна  $V_{зер}$  зависит от величины его линейного износа  $x$ . В работе [61] показано, что с увеличением величины  $x$  скорость износа зерна  $V_{зер}$  уменьшается (рис. 4.14). При этом безразмерный коэффициент  $\eta = \frac{x}{H}$  увеличивается (при выполнении условия  $H = const$ ). По сути, скорость износа зерна  $V_{зер}$  определяется зависимостью  $V_{зер} = f\left(\frac{1}{\eta}\right)$ . Это ведет к еще более интенсивному уменьшению скорости износа связки  $V_{св}$  с увеличением безразмерного коэффициента  $\eta$  в соответствии с зависимостью (2.26).

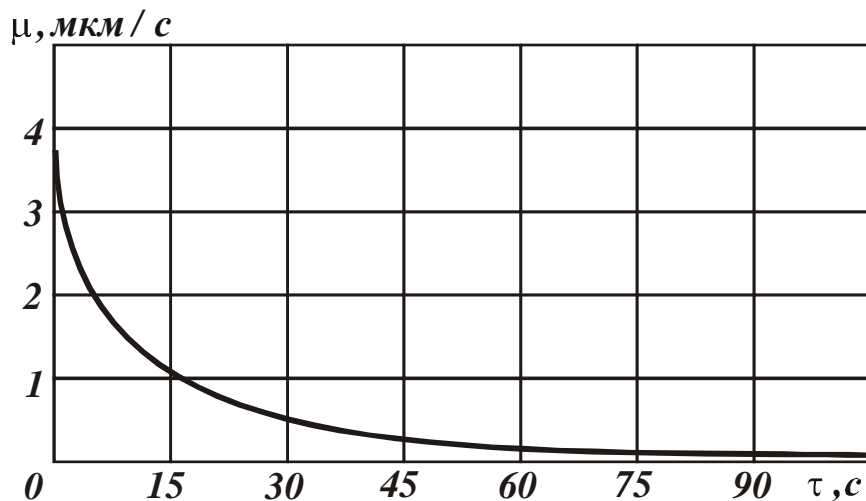


Рис. 4.14. Влияние продолжительности обработки  $\tau$  на скорость снижения высоты зерен  $\mu$  в переходной фазе шлифования синтетического сверхтвердого материала АСПК:  $V_{кр} = 20$  м/с;  $P_n = 3,0$  МПа [61]



Если использовать в зависимости (4.39) подстановку средней скорости износа зерна  $V_{зep}$  в виде показанной выше функции от безразмерного коэффициента  $\eta$ , а именно  $V_{зep} = f\left(\frac{1}{\eta}\right)$ , то экстремальный характер изменения удельного расхода алмаза  $q$  от безразмерного коэффициента  $\eta$  не нарушается, а, наоборот, усиливается, т.к. безразмерный коэффициент  $\eta$  будет входить в знаменатель с более высокой степенью.

#### 4.5. Экономика и технологическая себестоимость АИШ

Условия, особенности и структура экономической эффективности АИШ рассмотрены в [279] Общая постановка расчетной схемы себестоимости обработки при АИШ выполнена в [226]. Этому же посвящена работа [280].

Для определения технологической себестоимости обработки  $C$  воспользуемся расчетной зависимостью, приведенной в работе [76]:

$$C = a_1 \cdot q + \frac{a_2}{Q \cdot \rho_m}. \quad (4.44)$$

где  $a_1$  – стоимость алмаза в круге, коп/мг;  $a_2$  – зарплата рабочего, коп/с;  $q$  – удельный расход алмаза, мг/г;  $Q$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $\rho_m$  – плотность обрабатываемого материала, г/м<sup>3</sup>.

Зависимость (4.44) содержит два слагаемых.  $C$  увеличением производительности обработки  $Q$  первое слагаемое (удельный расход алмаза  $q$ ) изменяется по экстремальной зависимости (рис. 4.13), а второе слагаемое уменьшается. Очевидно, технологическая себестоимость обработки  $C$  также будет изменяться по экстремальной зависимости, проходя точку минимума. Однако, экстремальные значения производительности обработки  $Q$  для минимумов удельного расхода алмаза  $q$  и технологической себестоимости обработки  $C$  будут различны.

Для определения экстремального значения  $Q$ , соответствующего минимуму технологической себестоимости обработки  $C$ , продифференцируем функцию  $C$  по параметру  $Q$  и полученное выражение приравняем нулю

$$a_1 \cdot q'_Q - \frac{a_2}{\rho_m} \cdot \frac{1}{Q^2} = 0. \quad (4.45)$$

Первая производная  $q'_Q$  в точке минимума удельного расхода алмаза  $q$  (рис. 4.13) равна нулю. Исходя из уравнения (4.45), выполняется условие  $q'_Q > 0$ . Следовательно, точка минимума технологической себестоимости обработки  $C$  расположена на восходящей ветви экстремальной зависимости  $q-Q$ , т.е. смещена в область больших значений производительности обработки  $Q$ , рис. 4.15.

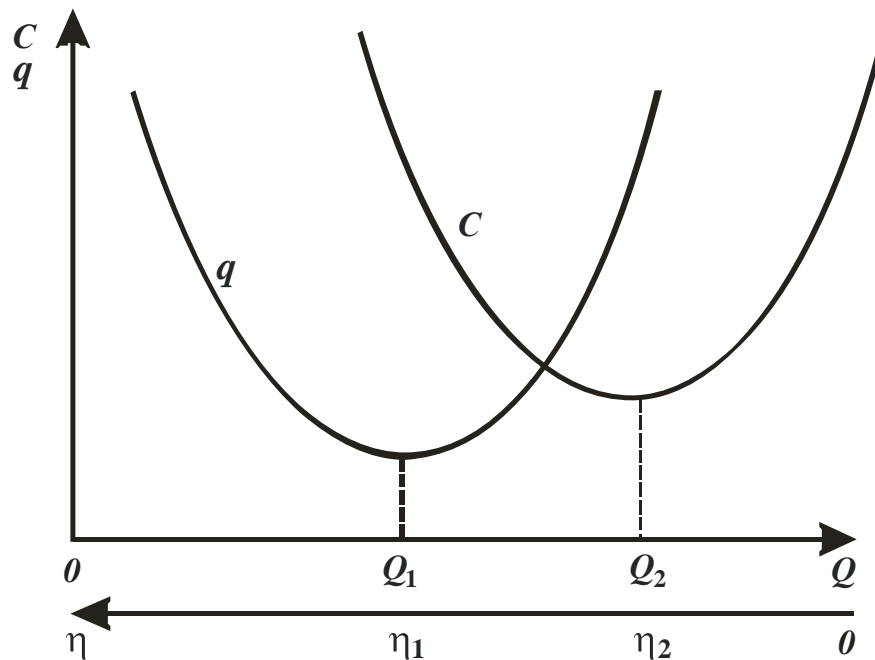


Рис. 4.15. Зависимости удельного расхода алмаза  $q$  и технологической себестоимости  $C$  от производительности обработки  $Q$  и безразмерного коэффициента  $\eta$  [176]

Показанные на рисунке 4.15 значения  $Q_1$  и  $Q_2$  определяют экстремальные значения производительности обработки в точках минимума

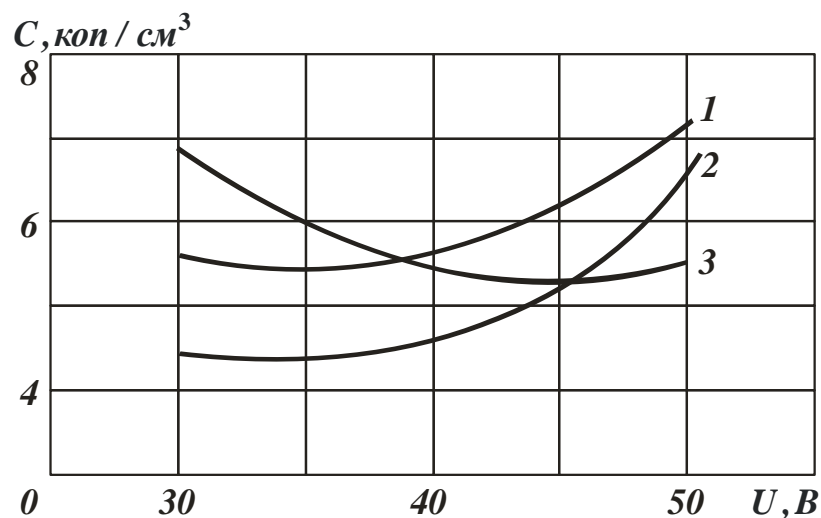
удельного расхода алмаза  $q$  и технологической себестоимости обработки  $C$ .

Производительность обработки  $Q$  является функцией от безразмерного коэффициента  $\eta$  и определяется зависимостью (4.35). С уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta$  производительность обработки  $Q$  увеличивается.

Следовательно, минимум технологической себестоимости обработки  $C$  достигается при меньших значениях безразмерного коэффициента  $\eta$  по сравнению с минимумом удельного расхода алмаза  $q$ , рис. 4.15.

Показанные на рис. 4.15 значения  $\eta_1$  и  $\eta_2$  определяют экстремальные значения безразмерного коэффициента  $\eta$  в точках минимума удельного расхода алмаза  $q$  и технологической себестоимости обработки  $C$ . В данном случае справедливо условие  $\eta_1 > \eta_2$ .

Проведенные экспериментальные исследования алмазно-искрового шлифования наплавочного материала 3Х2В8 подтвердили экстремальный характер изменения технологической себестоимости обработки  $C$  от электрического параметра – напряжения  $U$ , рис. 4.16.

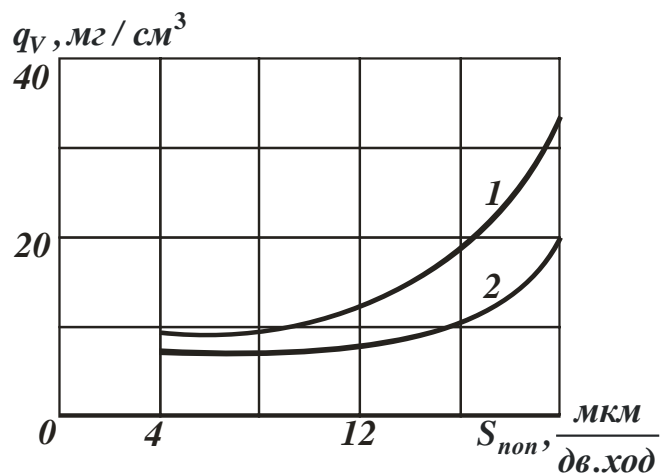


Связки алмазных кругов: 1 – М2-09; 2 – М1-10; 3 – М2-01

Рис. 4.16. Зависимости технологической себестоимости обработки  $C$  от напряжения  $U$  при АИШ [176]

При изменении напряжения  $U$  до определенного значения наблюдается уменьшение технологической себестоимости обработки  $C$ . При дальнейшем увеличении напряжения  $U$  происходит рост технологической себестоимости обработки  $C$  в связи с уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta$  и интенсивным выпадением режущих зерен из связки алмазного круга. Чем прочнее металлическая связка круга, тем больше значение напряжения  $U$ , при котором наблюдается увеличение технологической себестоимости обработки. Наибольшее экстремальное значение напряжения  $U$  имеет место для металлической связки М2-01.

При этом экспериментально установлено, что производительность обработки  $Q$  с увеличением напряжения  $U$  увеличивается, а удельный расход алмаза  $q$  изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку минимума. Экстремальные значения напряжения  $U$ , соответствующие точкам минимума технологической себестоимости обработки  $C$  и удельного расхода алмаза  $q$ , не совпадают. Минимум технологической себестоимости обработки  $C$  достигается при большем значении  $U$ . Это согласуется с приведенным выше теоретическим решением.

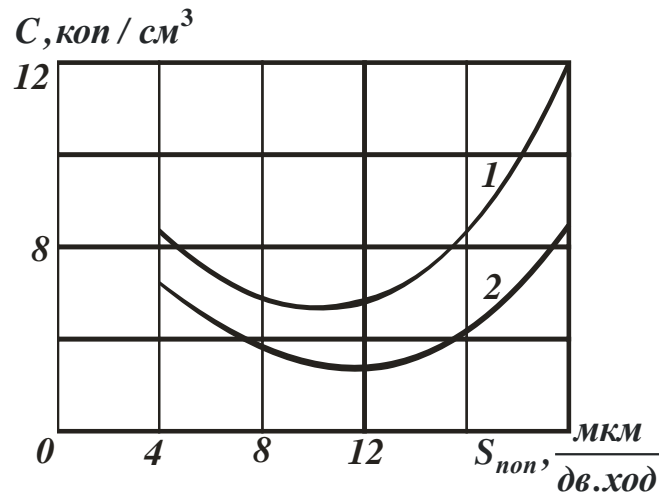


Алмазные зерна: 1 – без металлизации; 2 – с металлизацией

Рис. 4.17. Зависимость удельного расхода алмаза от поперечной подачи  $S_{поп}$  при шлифовании кругами с алмазными зернами марки АС15

Экспериментально установлено, что с увеличением поперечной подачи  $S_{non}$  (производительности обработки  $Q$ ) удельный расход алмаза  $q$  имеет тенденцию к увеличению, рис. 4.17. В данном случае экстремум функции  $q$  отсутствует. Исходя из зависимостей (3.7) и (3.9), это связано с преобладанием безразмерного коэффициента  $\eta$  в формировании функции удельного расхода алмаза  $q$ . Минимум  $q$  возможен при значениях поперечной подачи  $S_{non} < 4$  мкм/дв.ход.

Технологическая себестоимость обработки  $C$  с увеличением поперечной подачи  $S_{non}$  изменяется по экстремальной зависимости, рис. 4.18.



Алмазные зерна: 1 – без металлизации; 2 – с металлизацией

Рис. 4.18. Зависимость технологической себестоимости обработки  $C$  от поперечной подачи  $S_{non}$  при шлифовании кругами с алмазными зернами марки AC15

Первоначально с увеличением поперечной подачи  $S_{non}$  технологическая себестоимость обработки уменьшается, за счет увеличения производительности обработки  $Q$ , входящей в зависимость (4.44); затем увеличивается в связи с увеличением удельного расхода алмаза  $q$  (уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta$ ).

Как видим, в данном случае наличие второго слагаемого в (4.44) изменяет

характер зависимости  $C - S_{non}$  по сравнению с зависимостью  $q - S_{non}$ .

В отличие от зависимости  $q - S_{non}$ , зависимость  $C - S_{non}$  имеет экстремум, который указывает на существование оптимальных значений  $S_{non}$ ,  $\eta$ ,  $Q$ , а также экстремального (оптимального) значения удельного расхода алмазов  $q$ , который входит в расчетную зависимость технологической себестоимости обработки  $C$ .

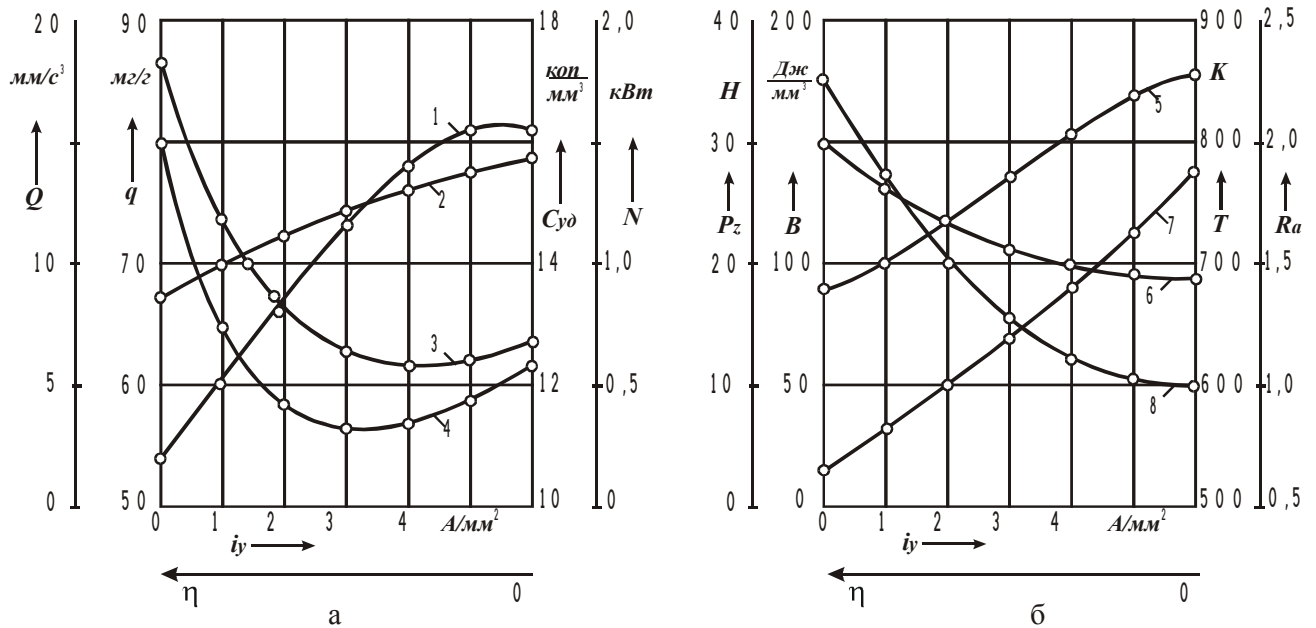
Металлизация алмазных зерен повышает их износостойкость и прочность удержания в металлической связке круга. В результате уменьшаются удельный расход алмаза и технологическая себестоимость обработки (рис. 4.17 и рис. 4.18). При этом минимум технологической себестоимости достигается при больших значениях поперечной подачи (производительности обработки).

Таким образом, теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены закономерности изменения технологической себестоимости обработки, показана связь технологической себестоимости с производительностью обработки, удельным расходом алмаза и безразмерным коэффициентом  $\eta$ . Установлено, что безразмерный коэффициент  $\eta$  оказывает определяющее влияние на формирование технологической себестоимости.

Приведенные теоретические результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными при исследовании процесса шлифования по упругой схеме торцем алмазного круга на металлической связке жаропрочного сплава ЭИ-765 [61]. Шлифование производилось с применением непрерывной (автономной) электрохимической правки круга для обеспечения его высокой режущей способности.

Установлено, что с увеличением плотности тока  $i_y$  в межэлектродном промежутке (между алмазным кругом и обрабатываемым материалом) удельный расход алмаза  $q$  и удельная себестоимость обработки  $C$  изменяются по экстремальным зависимостям: первоначально уменьшаются, а затем увеличиваются, проходя точки минимумов, рис. 4.19. Причем экстремальное

значение плотности тока  $i_y$ , соответствующее минимуму удельной себестоимости обработки  $C$ , больше экстремального значения плотности тока  $i_y$ , соответствующего минимуму удельного расхода алмаза  $q$ . Это полностью подтверждает достоверность приведенных выше теоретических решений, графически показанных на рисунке 4.15.



Обрабатываемый материал: ЭИ 765, шлифовальный круг; АС6 100/80 М2-01 4, режимы обработки:  $V_{кр} = 22$  м/с,  $P_n = 0,6$  МПа,  $S_{пр} = 1$  м/мин

1 – производительность,  $Q$ ; 2 – мощность,  $N$ ; 3 – удельная себестоимость,  $C$ ; 4 – удельный расход алмаза,  $q$ ; 5 – сила резания,  $P_z$ ; 6 – температура,  $T$ ; 7 – шероховатость обработки,  $R_a$ ; 8 – энергоемкость шлифования,  $B$

Рис. 4.19. Влияние условной плотности тока на параметры шлифования

Для наглядности данного решения на рисунке 4.19 дополнительно оригиналу [61] показана шкала изменения безразмерного коэффициента  $\eta$ , которая противоположна шкале изменения плотности тока  $i_y$ .

Из рисунка 4.19 также следует существенное увеличение (в 6 раз) производительности обработки  $Q$  с увеличением плотности тока  $i_y$ .

Произведение удельного расхода алмаза  $q$  и производительности обработки  $Q$  с увеличением плотности тока  $i_y$  непрерывно увеличивается, табл. 4.9.

Таблица 4.9. Значения произведения  $q \cdot Q$

$i_y, \text{A}/\text{мм}^2$	0	1	2	3	4	5	6
$q \cdot Q,$ $\text{мг}/\text{мм}^3 \cdot \text{мм}^3/\text{с}$	205	260	472	605	784	890	1008

Согласно зависимости (3.7), это указывает на уменьшение безразмерного коэффициента  $\eta$ , что с физической точки зрения обусловлено увеличением скорости износа связки круга, исходя из зависимости (2.26).

Следовательно, с увеличением плотности тока  $i_y$  увеличивается скорость износа связки круга, а это ведет к уменьшению безразмерного коэффициента  $\eta$ , т.е. к уменьшению величины линейного износа зерна до момента его выпадения из связки и соответственно повышению режущей способности алмазного круга - увеличению производительности обработки  $Q$ .

Анализируя зависимости (4.35) и (4.36), видим, что с уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta$  производительность обработки  $Q$  непрерывно увеличивается, а удельный расход алмаза  $q$  изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку минимума. Этим показано, что теоретические решения хорошо согласуются с экспериментальными данными, показанными на рисунке 4.19.

Уменьшение величины  $\eta$  вследствие увеличения плотности тока  $i_y$  способствует более глубокому проникновению обрабатываемого материала в рабочую поверхность алмазного круга, о чем свидетельствует увеличение параметра шероховатости обработки  $R_a$ , рис. 4.19.

Уменьшение безразмерного коэффициента  $\eta$  и соответственно величины



линейного износа  $x$  обеспечивает уменьшение условного напряжения резания  $\sigma$  (или энергоемкости шлифования) в соответствии с зависимостью (4.7), что также хорошо согласуется с экспериментальными данными, показанными на рисунке 4.19.

Таким образом показано, что эффект от применения непрерывной правки алмазного круга на металлической связке, автономной или в зоне резания, электрохимической или электроэрозионной (АИШ), с физической точки зрения обусловлен уменьшением безразмерного коэффициента  $\eta$ , который является основным параметром, ответственным за показатели шлифования: производительность и шероховатость обработки, удельный расход алмаза и удельную себестоимость обработки, силу резания и энергоемкость шлифования.

В этой связи особо важен выбор характеристики алмазного шлифовального круга. Совершенствование конструкции и состава рабочей части шлифовальных кругов с позиций повышения их производительных, стойкостных и ресурсных возможностей всегда актуальная задача. В зависимости от формулировки целевой функции и ограничений предполагается обеспечить избирательный (относительный) или комплексный (абсолютный) выигрыш, либо достичь прогрессивного компромисса во времени, затратах, условиях производства. Применение в инструментах сверхтвёрдых материалов во многих случаях позволяет достигать бесспорных технологических и экологических преимуществ по сравнению с использованием обычных абразивов. Однако существенно более высокая стоимость сверхтвёрдых перед обычными абразивами требует внимательного экономического анализа как подобных технологических альтернатив, так и собственных поливариантных сочетаний связки и марки, зернистости, концентрации шлифпорошка в сверхтвёрдых инструментах.

Успех конкретного шлифовального круга предопределяется, в основном, двумя весьма противоречивыми обстоятельствами: способностью прочно

удерживать на рабочей поверхности режущие зёрна и, одновременно, податливостью рабочей поверхности обновлению, очищению от налипов и изношенных зёрен.

С повышением относительного вклада стоимости шлифпорошка в цену шлифовального круга, соответствующим переходу от обычных абразивов к сверхтвёрдым, роль первого условия возрастает: экономическая эффективность применения синтетических алмазов и других сверхтвёрдых материалов в большей степени зависит от полноты использования режущих зёрен в кругах, сокращения их удельного расхода. С использованием алмазных шлифпорошков повышенной прочности и зернистости эта тенденция проявляется в ещё большей степени.

Совершенствование технологий синтетических сверхтвёрдых материалов, расширенное использование в передовых отраслях промышленности конкурентоспособных тепло-, износостойких и других труднообрабатываемых материалов, а также ужесточение реалий рыночной экономики на современном этапе отечественного производства и потребления сверхтвёрдых абразивов закономерно приводят ко всё более широкому использованию в кругах высокопрочных металлических связок с повышенной надёжностью алмазоудержания. Например, в наступившем веке свыше 50% номенклатуры шлифовальных кругов производства Полтавского алмазного завода, крупнейшего на Украине и одного из самых крупных в мировой индустрии синтетических сверхтвёрдых материалов и инструментов из них, представлено инструментом именно на металлических связках [281].

Повышение прочности связки неизбежно снижает способность кругов к самозатачиванию её естественным истиранием и разрушением в процессах в зоне шлифования. В этом случае необходимая податливость рабочей поверхности круга обновлению режущего рельефа обеспечивается принудительной правкой в зоне резания или автономно, производимой непрерывно или периодически. Работа правки осуществляется благодаря

подводу специально генерируемой дополнительной энергии, чаще всего электричества (источники – генераторы импульсного и постоянного тока, в том числе в режиме обслуживания АИШ), механических колебаний (ультразвуковой генератор), а также света (лазер), плазмы (плазмотрон), их возможных комбинаций.

Следуя логике электроэрозионных процессов в межэлектродном зазоре между материалом связки и обрабатываемым, а также в замыкающихся – размыкающихся скользящих стружечных контактах в зоне АИШ [170], в сопоставимых условиях обработки инструмент на металлических связках разных марок, физико-механические свойства которых характеризуются различной прочностью, износо- и эрозионной стойкостью, будет изнашиваться с разной интенсивностью. Практика АИШ твердых сплавов, износо- и теплостойких наплавов и покрытий, магнитотвердых и других труднообрабатываемых материалов показывает, что эти различия в интенсивности износа кругов на различных металлических связках и, следовательно, в их ресурсных возможностях в одних и тех же условиях шлифования (с разным для каждой связки приближением к некоторым оптимальным) могут быть весьма значительными [165, 235].

Так, при АИШ теплостойких хромовольфрамowych наплавов типа 3Х2В8 с заданной производительностью  $Q_{ном} = 160 \text{ см}^3/\text{мин}$ , обеспеченном достаточным для стабильной работы инструмента вводом дополнительной электроразрядной энергии в зону резания, в зависимости от марки связки удельный расход алмазов  $q$  изменяется от  $19 \text{ мг}/\text{см}^3$  до  $31 \text{ мг}/\text{см}^3$ , или в 1,6 раз (табл. 4.2).

При этом уровень отклонений от заданной производительности, зафиксированных в проведенных опытах АИШ по жесткой схеме обработки, не превышал 5%. В качестве источника технологического электроразрядного тока (амплитудным напряжением  $40\text{В}$  в обсуждаемых экспериментах) использовался блок электропитания модели ИТТ-35 производства Бакинского станкостроительного завода, специально предназначенный для возбуждения и

поддержания электроразрядных процессов в зоне шлифования и рекомендуемый для комплектования модернизированных под АИШ и соответствующих специальных заточных, плоско- и круглошлифовальных станков. Здесь заметим, что на тех же механических режимах обработки (продольная и поперечная подача соответственно 0,8 м/мин и 0,01 мм/дв.ход, скорости детали и круга соответственно 40 м/мин и 25 м/с) при выключенном блоке электропитания процесс шлифования постепенно теряет производительность. Так, при работе без электроразрядного тока кругами на связках М1-10 или М2-01, уже через 25-30 мин утрачивается 50-60% расчетной производительности [228].

Воспользуемся данными таблицы 4.4 в экономическом расчете альтернатив операционного обеспечения АИШ алмазными кругами на различных металлических связках в инвариантах режима их электроэрозионной правки в зоне резания.

Для этого ресурс алмазного круга  $T$  определим как прогноз общей длительности его участия в конкретных рабочих процессах при повторяемости воспроизводимых в них условий, следствием чего и будет практическое постоянство в последовательных актах шлифования производительности обработки  $Q$  (см<sup>3</sup>/мин) и удельного расхода алмазов  $q$  (мг/см<sup>3</sup>). Таким образом, полученные из эксперимента сведения распространяются на весь срок службы инструмента  $T$  (мин):

$$T = \frac{0,2 \cdot 10^3 m_a}{qQ}. \quad (4.46)$$

Масса алмазов в круге  $m_a$  (кар), входящая в зависимость (4.46), является паспортной характеристикой инструмента. Для известных типоразмерной характеристики шлифовального круга (1А1 200x10x5) и доли участия алмазов в единице объема рабочего (алмазоносного) слоя инструмента (0,25),  $m_a$  составляет 135 карат [282]. Тогда в рассматриваемой задаче выражение (4.46) можно преобразовать к виду:

$$T = \frac{27 \cdot 10^3}{qQ} \quad (4.47)$$

или, с учетом  $Q \approx Q_{\text{ном}}$  :

$$T = \frac{169}{q}. \quad (4.48)$$

Результаты расчета ресурсных возможностей алмазных кругов на различных металлических связках, применительно к рассматриваемым конкретным условиям АИШ, приведены в таблице 4.10, использующей данные по  $q$  и  $qQ$  из таблицы 4.2 [228].

Таблица 4.10. Характеристики износа и ресурс алмазных кругов на металлических связках

Код связки	M1-10	M2-01	M2-09	M1-04	M2-12	M1-01
Удельный расход алмазов $q$ , мг/см <sup>3</sup>	19	20	21	23	28	31
Скорость массового расхода алмазов $qQ$ , мг/мин	31,4	32,0	34,7	36,8	43,4	46,5
Ресурс алмазного круга $T$ , мин	860	844	778	734	622	580

С учетом сложившейся на рынке алмазного инструмента цены шлифовального круга  $C$  (грн.) и приведенного в таблице 4.10 результата расчета его ресурса  $T$  (мин), в зависимости от необходимого времени работы  $t$  (мин), затраты  $E$  (грн.) на такой инструмент определяются следующим образом:

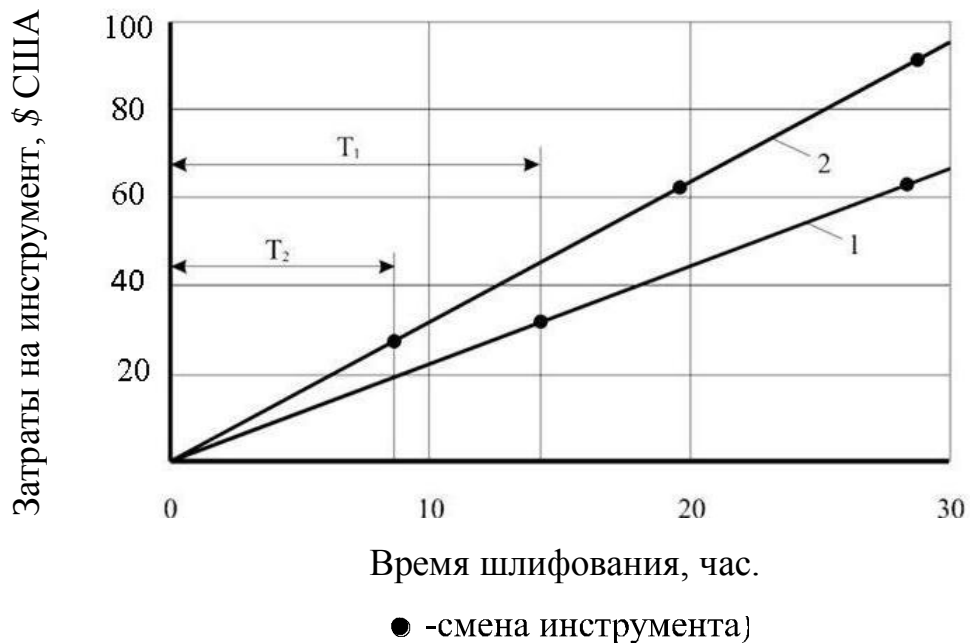
$$E = C \frac{t}{T}. \quad (4.49)$$

Тогда дополнительные расходы (или экономия)  $\Delta$ , связанные с переходом на время  $t$  к использованию инструмента другой характеристики, с ценой  $C_2$  и ресурсом  $T_2$  вместо инструмента с ценой  $C_1$  и ресурсом  $T_1$ , рассчитываются так:

$$\Delta = \left( \frac{C_1}{T_1} - \frac{C_2}{T_2} \right) t, \quad (4.50)$$

причем в зависимости от знака полученного результата у потребителя инструмента возникают дополнительные расходы (если  $\Delta < 0$ ) или экономия (если  $\Delta > 0$ ).

На рисунке 4.20 показаны зависимости  $E = E(t)$  для шлифовальных кругов на наиболее распространённых из рассматриваемых связках, М2-01 и М1-01:  $C_1 = C_2 = 28,52 \$ США = 728,93$  грн. по прейскуранту ПАТ «Полтавский алмазный инструмент» (<http://www.pdp.kiev.ua>) или по курсу Национального банка Украины с 1 декабря 2016 г. (2555,85 грн. за 100 \$ США; <http://minfin.com.ua/currency>).



Марки связок алмазных кругов: 1 – М2-01; 2 – М1-01

Рис. 4.20. Затраты на алмазные круги 1А1 200х10х5 АС6 250/200 4 на разных металлических связках в одинаковых условиях АИШ (вариант)

Как следует из (4.49) и (4.50), замена алмазного круга на связке М2-01 таким же, но на менее износоустойчивой связке М1-01, повышает необходимые затраты на инструмент на 45% (на 0,92 \$ США или 23,51 грн/станкочас).

Таким образом, правильный выбор марки металлической связки алмазного инструмента может оказывать весьма существенное положительное влияние на технико-экономические показатели функционирования технологической системы обработки с электроэрозионной правкой кругов в зоне резания (АИШ). Нарушения установленного научно обоснованного технологического регламента АИШ, как и отсутствие такого научно обоснованного регламента, могут в отдельных случаях обеспечивать требуемую производительность обработки, но приводить при этом к значительному сокращению ресурса и, соответственно, недоиспользованию режущего потенциала алмазного инструмента, росту затрат средств на него и вспомогательного времени на обслуживание его смен на станке в процессе выполнения производственного задания.

Принятая в СССР преимущественная ориентация на развитие массовых и крупносерийных производств вполне оправдывала затраты на поисковые разработки многочисленных специальных связок алмазного шлифовального инструмента, в том числе и на металлической основе, к тому же рекомендуемых к использованию совместно со сверхтвёрдыми абразивами определенных марок (прочности). В рамках специализированного подхода к разработке и промышленному освоению производства алмазных кругов, в сочетании с корректным выбором зернистости шлифпорошков в кругах и режимов шлифования, действительно есть условия для удовлетворительного (а во многих случаях и оптимального) инструментального обеспечения станочных комплексов, отличающихся постоянством технологических наладок, когда время последовательных реализаций определённой технологической операции превышает ресурсные возможности используемого алмазного шлифовального инструмента, сколь бы значительно не было преимущество по периоду сменности перед традиционными абразивными кругами.

Условия мелкосерийного и, особенно, единичного производства, тем более при неопределённости содержания портфеля будущих заказов, весьма

характерной рыночному хозяйствованию, и неочевидных прогнозах в этом отношении, требуют универсализации подходов к управлению режущей способностью алмазных шлифовальных кругов. Без этого трудно ожидать эффективного использования их потенциальных преимуществ перед инструментом из обычных абразивов в условиях мелкосерийного и единичного производства. Выбор сверхтвёрдого шлифпорошка и связки круга, каким бы удачным он не был даже из обширной номенклатуры марок (свойств), умелое использование предоставляемых станком режимных возможностей, как правило, не является достаточными для экономического успеха механообработки в условиях жёсткой конкуренции мелкомасштабных производств. Возникают проблемы частой переналадки с многократной сменой инструмента в пределах его ресурсных возможностей, формирования оперативных запасов инструментов с различными характеристиками, прежде всего марочного состава сверхтвёрдых шлифпорошков и связок, а также зернистости абразива и его концентрации в абразивосодержащем композите круга [168].

Снижение актуальности промышленного производства алмазных кругов на металлических связках с большим разнообразием марок (свойств) можно проследить на примере крупнейшего в Украине (и в СССР) предприятия ПАТ «Полтавский алмазный инструмент» (в СССР – Полтавский завод искусственных алмазов и алмазного инструмента). На основе реальной рыночной конъюнктуры уже в 2000 году завод предлагал потребителям алмазные круги на металлических связках практически только двух марок, а именно М2-01 и М1-01, составивших соответственно 80% и 15% от общего предложения кругов на металлических связках [281].

Использование технологий АИШ и электроэрозионной правки инструмента, основанных на введении в зону шлифования (правки) дополнительной электрической энергии в форме электрических разрядов способствует разрешению узла противоречий между режущей способностью



алмазных кругов на металлических связках, прочностью этих связок, производительными возможностями и экономикой процесса шлифования. Рассмотренные выше примеры убедительно демонстрируют это. Типичную практику реализации различных способов обработки в идентичных кинематико-геометрических условиях иллюстрирует рисунок 4.8 на операциях внутреннего шлифования подшипниковой стали ШХ15, твёрдого сплава ВК15 и магнитотвёрдого сплава ЮНДК24Т2. На рисунке 4.21 показан характерный пример сопоставления энергоёмкости и производительности алмазного и алмазно-искрового круглого шлифования от продолжительности обработки в идентичных механических условиях, обрабатываемый материал – теплостойкая наплавка марки 3Х2В8 [230].

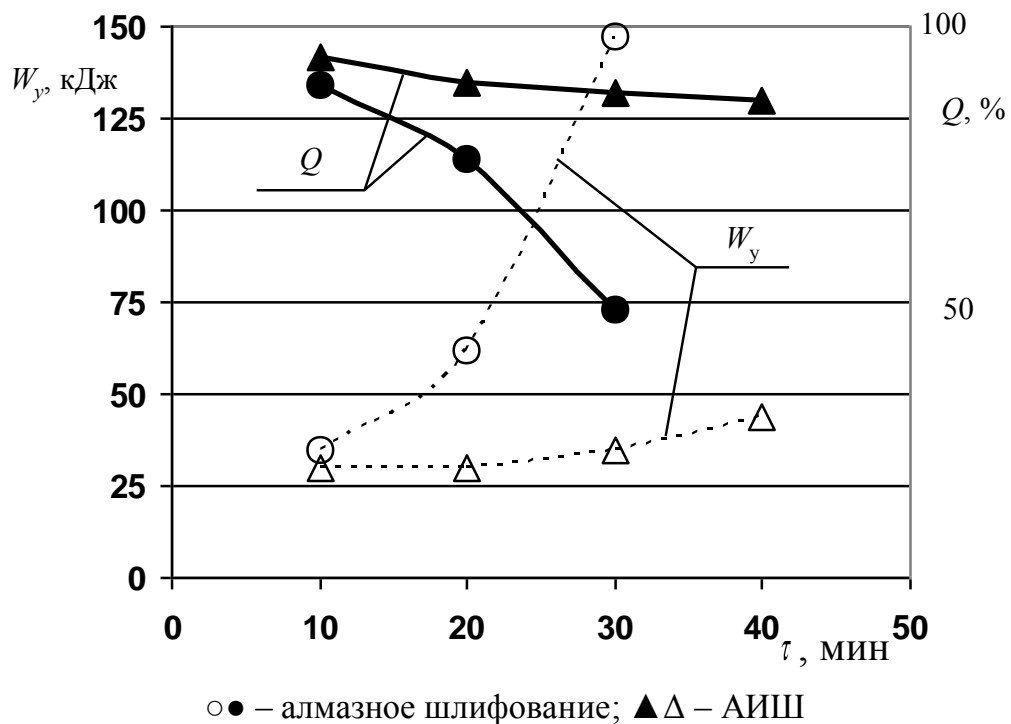


Рис. 4.21 Зависимость энергоёмкости  $W_y$  и производительности  $Q$  шлифования от продолжительности обработки  $\tau$

Условия АИШ с данными по рисунку 4.21 соответствуют обработке восстановленного наплавкой вала штрипсового стана «300» металлургического комбината «Криворожсталь» (объём снимаемого материала

примерно 2000 см<sup>3</sup>). Сборная конструкция инструмента большого диаметра (в условиях комбината использовался алмазный шлифовальный круг типоразмерной характеристики 1А1 800х90х5х305) впервые разработана в ИСМ НАН Украины специально для шлифования крупногабаритных деталей типа валков прокатных станов и им подобных [229].

Снижение энергоёмкости собственно шлифования и повышение энергоотдачи работы стружкообразования относится к важнейшим преимуществам алмазно-искровой обработки перед обычной. Затраты энергии на срез металла снижаются главным образом вследствие снижения потерь на трение связки круга с заготовкой и стружкой. Совершенствование метода и оборудования электроэрозионной алмазно-абразивной обработки на собственной основе, с более полным использованием возможностей комбинирования рабочих процессов путём разработки и освоения технологий и станков двойного скоростного шлифования (с увеличенными скоростями подачи заготовок), позволяет, при сохранении и улучшении выходных технологических показателей по производительности и качеству обработки, существенно снизить установленную мощность электродвигателя привода главного движения и суммарную (например, с установленной мощности всех электродвигателей в 15,6 кВт у станка-прототипа модели ЗК227ВР до 10,1 кВт у специализированного для технологий АИШ станка мод. ЗМ227ВЭРФ2, как это отмечено в первой главе, подраздел 1.2).

С повышением электрической нагрузки электроразрядных процессов в зоне АИШ удельный расход алмазов сначала снижается (с ростом остроты круга и фактической производительности обработки), достигает минимума ( $q=q_{\min}$ ) с приближением фактической производительности к расчётной (по жёсткой схеме обработки) и вновь повышается (возможности повышения остроты круга и производительности обработки исчерпаны, принудительный электроэрозионный износ связки чрезмерен: число пребывания алмазных зёрен в зоне резания сокращается, их выпадание из связки всё более приобретает

обвальнный характер, что находит своё отражение в постепенном снижении производительности обработки). Такая закономерность (рисунок 4.22;  $K_{II}$  – критерий Палатника [283]) имеет место при реализации разных схем обработки различных материалов.

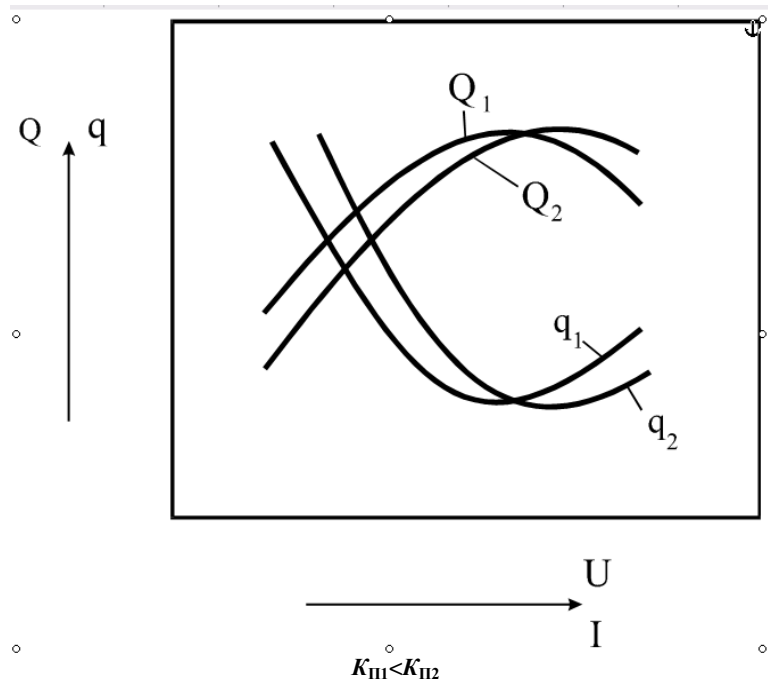


Рис. 4.22. Характер зависимостей производительности обработки  $Q$  и удельного расхода алмазов  $q$  от напряжения  $U$  и силы тока  $I$  электрических импульсов при АИШ кругами на связках различной эрозионной стойкости

С превышением мощности дополнительного электроэрозионного воздействия, соответствующей оптимальному (минимальному) значению расхода алмазов, примерно пропорционально сокращается и ресурс режущего инструмента, как это следует из исследований обрабатываемости АИШ различных труднообрабатываемых материалов [166]. С другой стороны, в процессах АИШ с применением различных связок при одинаковой интенсивности электроэрозионного воздействия режущая стабильность инструмента также может достигаться разной ценой (рис. 4.20).

Следствием пренебрежения разработкой и использованием научно обоснованных рекомендаций в некоторых ситуациях высокой режущей способности инструмента и стабильной производительности шлифования изнанкой внешнего благополучия технологического процесса может быть повышенный уровень расхода алмазов и шлифовальных кругов, соответствующих производственно-финансовых издержек, дискредитация потенциально прогрессивных технологий.

Как показывает теория и практика технологической себестоимости АИШ [226], существуют экстремальные значения производительности обработки и затупления режущих зёрен до их выпадения из связки круга, при которых удельный расход алмаза принимает минимум. Такой же характер изменения имеет зависимость «себестоимость – производительность» (рисунок 4.15), что позволяет разрабатывать и эксплуатировать реально оптимальные технологии АИШ [124].

Эффект более высоких показателей АИШ обусловлен прежде всего поддержанием на рабочей поверхности круга развитого режущего рельефа, обладающего высокой работоспособностью. При электроэрозионном воздействии в зоне обработки происходит полное или частичное сгорание образующихся микростружек, что практически исключает засаливание рабочей поверхности круга в процессе шлифования. За счёт дозированного электроэрозионного (термического) разрушения поверхностных слоёв металлической связки достигается управляемое выступание режущих зёрен над уровнем связки. Указанные факторы позволяют производить шлифование с увеличенными глубинами, в результате высокой остроты алмазного круга уменьшаются упругие перемещения элементов технологической системы, фактическая производительность обработки почти не отличается от номинальной (расчётной), определяемой режимами резания.

#### 4.6. Условия и обеспечение устойчивого и рационального АИШ

Для решения задач выбора оптимальных параметров операций АИШ важно соблюсти два условия его осуществления – необходимое и достаточное. Необходимое условие заключается в обеспечении равномерного во времени износа алмазного круга (стабилизации параметров его режущего рельефа) путем введения в зону резания дополнительной энергии в форме электрических разрядов с целью достижения высокой режущей способности круга (вплоть до его полного износа).

Достаточное условие заключается в оптимизации процесса шлифования, т.е. в определении оптимальных параметров режущего рельефа алмазного круга и условий шлифования на основе критериев наибольшей производительности или наименьшей технологической себестоимости обработки с учетом требований к качеству обрабатываемых поверхностей.

Изучению указанных условий в предшествующей научно-технической литературе уделено довольно большое внимание, получены важные решения. Однако эти решения получены экспериментальным путем для частных условий обработки, что не позволяет в полной мере раскрыть потенциальные возможности операций АИШ и выйти на более высокий уровень технико-экономических показателей обработки.

В настоящей работе поставлены и решаются задачи выявления и обоснования новых технологических возможностей операций АИШ аналитическим путем.

В результате проведенных теоретических исследований впервые получена и подробно обоснована и исследована важная аналитическая зависимость (2.26), увязывающая скорости износа связки  $V_{св}$  и зерен  $V_{зер}$  круга посредством безразмерного коэффициента  $h$  – обобщенного параметра процесса, определяющего степень затупления зерен и изменяющегося в пределах  $0...1$  (для острого зерна  $h=0$ , для затупленного зерна  $h=1$ ). Из

зависимости (2.26) вытекает условие обеспечения устойчивого во времени процесса шлифования:  $V_{св} > V_{зеп}$ .

При невыполнении этого условия (т.е. при  $V_{св} < V_{зеп}$ ) процесс шлифования будет протекать неустойчиво – алмазный круг будет работать в режиме затупления, что не позволит реализовать его потенциальные возможности. Производительность обработки  $Q$  с течением времени шлифования  $t$  будет непрерывно уменьшаться. Её постоянство обеспечивает поддержка определённого соотношения  $V_{св} > V_{зеп}$ , рис. 4.23. При этом с уменьшением постоянства безразмерного коэффициента  $h$  в пределах от 1 до 0 производительность обработки  $Q$  будет увеличиваться.

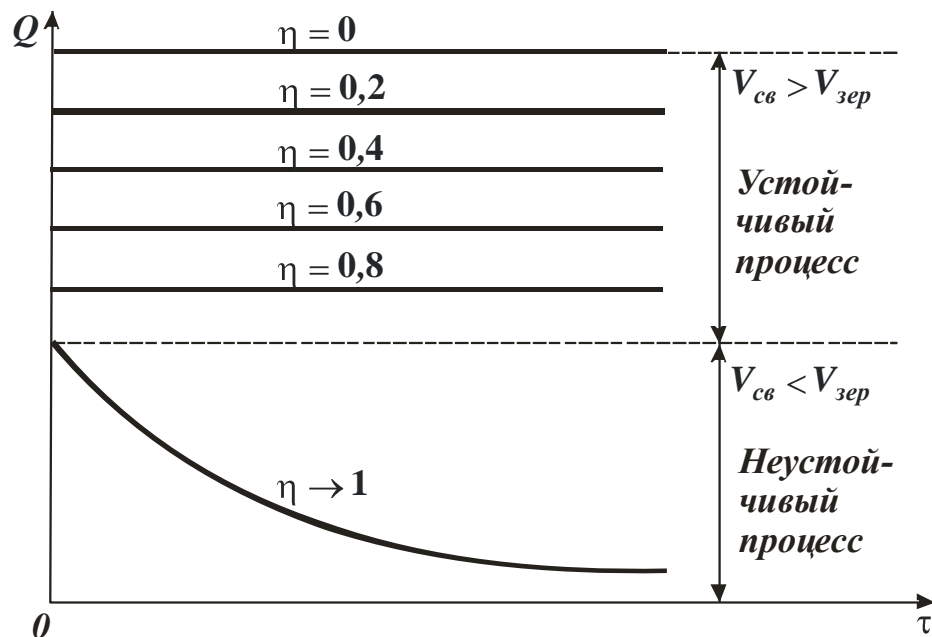
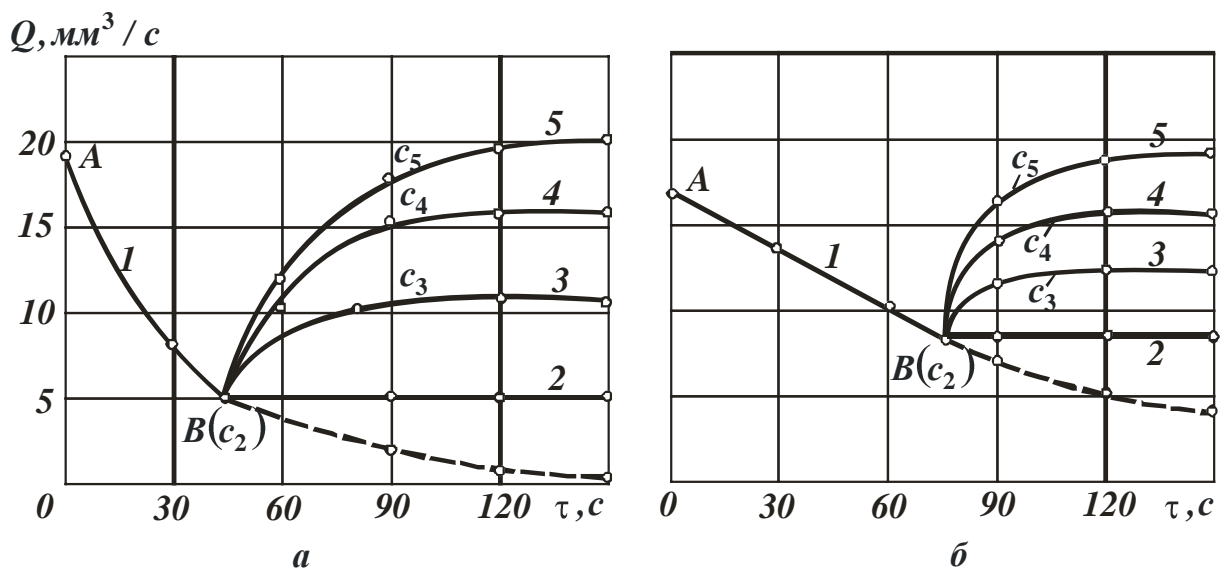


Рис. 4.23. Характер изменения производительности обработки  $Q$  с течением времени шлифования  $t$  для различных значений безразмерного коэффициента  $h$

Данный теоретический результат хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований [61] при шлифовании труднообрабатываемых материалов алмазным кругом на металлической связке

с применением непрерывной автономной электрохимической правки, рис. 4.24. Как следует из приведенного рисунка, при шлифовании без применения электрохимической правки алмазного круга производительность  $Q$  с течением времени обработки  $t$  непрерывно уменьшается. Применение электрохимической правки позволяет стабилизировать во времени производительность обработки  $Q$ . При этом с увеличением условной плотности тока  $i_y$  в цепи управления производительность обработки  $Q$  увеличивается. Из этого вытекает, что кривая 1 (рис. 4.24) соответствует условию  $V_{св} < V_{з\text{ер}}$  (определяющему неустойчивый процесс шлифования), а кривые 2, ..., 5 – условию  $V_{св} > V_{з\text{ер}}$  (определяющему устойчивый процесс шлифования). Увеличение условной плотности тока  $i_y$  в цепи управления соответствует уменьшению безразмерного коэффициента  $h$  в пределах от 1 до 0.



Обрабатываемый сплав –	а: КНТ-16	Усилие прижима, МПа –	а: 1,8
	б: ЭИ-765.		б: 0,6.
Плотность тока, $A/mm^2, \cdot 10^4$ –	а: 1 – 0, 2 – 1,5, 3 – 3, 4 – 4,5, 5 – 6;		
	б: 1 – 0, 2 – 1, 3 – 2, 4 – 3, 5 – 4.		

Рис. 4.24. Влияние продолжительности шлифования и условной плотности тока в цепи управления на производительность обработки [61]

Из зависимости (2.26) следует, что между скоростью износа связки и безразмерным коэффициентом  $h$  существует обратно пропорциональная связь. Увеличение скорости износа связки предполагает уменьшение безразмерного коэффициента  $h \rightarrow 0$ , т.е. повышение остроты зерен и соответственно режущей способности алмазного круга.

Из этого можно сделать вывод, что эффект АИШ состоит прежде всего в возможности увеличения скорости износа связки  $V_{\text{зер}}$  и соответственно уменьшения безразмерного коэффициента  $h \rightarrow 0$  за счет принудительного удаления с рабочей поверхности алмазного круга затупившихся зерен путем электроэрозионного (ударно-термического) разрушения металлической связки. По сути, полученное теоретическое решение является математическим выражением необходимого условия осуществления процесса АИШ, который заключается в стабилизации во времени безразмерного коэффициента  $h$ .

Зная безразмерный коэффициент  $h$  (для заданной скорости износа металлической связки, обусловленной электроэрозионным воздействием на рабочую поверхность круга), по аналитическим зависимостям можно определить параметры режущего рельефа круга и основные технологические показатели шлифования: производительность, технологическую себестоимость, шероховатость обработки и другие.

На основе аналитических зависимостей, теоретически обосновано достаточное условие осуществления процесса АИШ. Его суть состоит в определении оптимальных значений безразмерного коэффициента  $h$  по критериям наибольшей производительности обработки, минимума удельного расхода алмаза и технологической себестоимости обработки, заданной шероховатости обрабатываемой поверхности, силы и мощности резания при шлифовании и т. д. В обобщенном виде структурная схема условий осуществления АИШ показана на рисунке 4.25.





Рис. 4.25. Структурная схема выбора оптимальных условий АИШ

На рисунке 4.26 приведена структурная схема оптимизации процесса шлифования [61]. Суть ее сводится к тому, что оптимизация процесса шлифования достигается стабилизацией (за счет применения электрохимической правки алмазного круга на металлической связке) значения высоты  $h$  выступания контактирующих зерен над связкой, оптимизированного по соответствующему выходному показателю шлифования  $Q, q, C, R_z$

(соответственно производительность, удельный расход алмаза, себестоимость обработки и шероховатость обработанной поверхности). Индексы “исх”, “уст”, “опт” (рис. 4.26) относятся к исходным, установившимся и оптимизированным параметрам – высоте выступания зерен  $h$ , производительности обработки  $Q$ , удельному расходу алмаза  $q$ , себестоимости  $Q$ , шероховатости  $R_z$ ;  $V_z$ ,  $V_c$  – соответственно интенсивности износа зерна и съема связки;  $\tau$  – длительность шлифования.

По структурной схеме из рисунка 4.26 в основу оптимизации процесса шлифования положена высота выступания контактирующих зерен над связкой  $h$ , тогда как по предложенной структурной схеме (рис. 4.25) – величина линейного износа зерен  $X$  до момента их выпадения из связки круга, определяемая безразмерным коэффициентом  $\eta$ . Высота выступания контактирующих зерен над связкой  $h$  в логистике оптимизации по рис. 4.25 является производной величиной, зависящей от параметров  $X$ ,  $\eta$  и, соответственно, скорости износа связки круга  $V_{св}$ .

На схеме из рисунка 4.26 показано, что для обеспечения устойчивого во времени процесса шлифования интенсивности износа зерна и съема связки должны быть равны. Однако, исходя из аналитической зависимости (2.26), данное условие выполняется при  $h=1$ , что, как показано выше, отрицает возможность реализации устойчивого процесса шлифования, кроме шлифования синтетических сверхтвердых материалов, когда практически отсутствует внедрение режущих зерен алмазного круга в обрабатываемый материал. В этом случае  $X=H$ , т. е.  $h=1$ , и поэтому появляется возможность реализации устойчивого процесса шлифования. Следовательно, соблюдение условия  $V_{св} = V_{з\text{ер}}$ , может обеспечить устойчивый процесс шлифования кругами из синтетических сверхтвёрдых материалов лишь при обработке идентичных материалов (синтетических сверхтвердых). В остальных случаях, т. е. при шлифовании менее твердых материалов (твердых сплавов,

высокопрочных пластичных материалов и т. д.) скорость износа связки  $V_{св}$  должна быть больше скорости износа зерен  $V_{зер}$  круга.

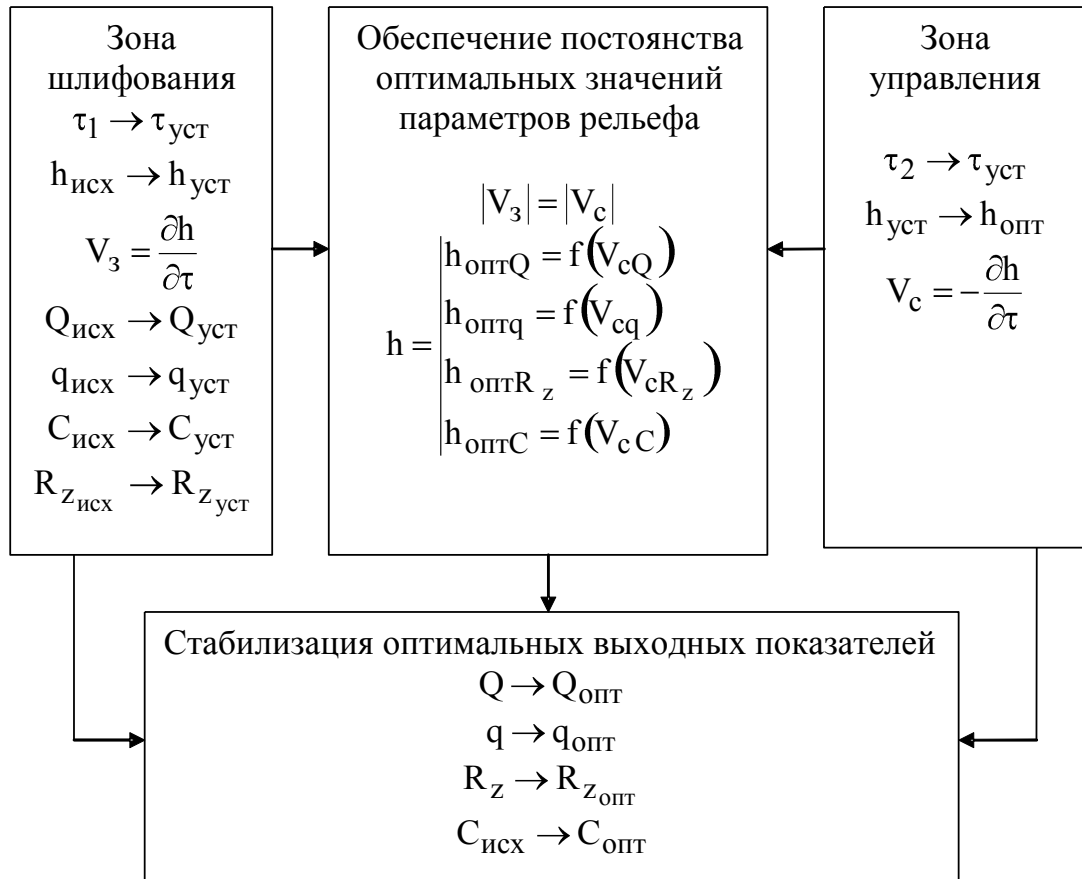


Рис. 4.26. Структурная схема оптимизации процесса шлифования [61]

Для эффективного ведения процесса алмазного шлифования наряду с обеспечением минимума технологической себестоимости обработки  $Q$  (или минимума удельного расхода алмаза  $q$ ) необходимо выполнить требования по параметрам качества обработки. Вопросу удовлетворения заданным ограничениям по шероховатости обработанной поверхности после АИШ уделено внимание в работе [4].

Таким образом предложена и комплексно обосновывается новая, по своей сути расчетно-экспериментальная методика выбора оптимальных условий АИШ, позволяющая в максимальной степени использовать высокие потенциальные возможности этого прогрессивного метода обработки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в монографии исследования используют предшествующие передовые достижения научных учреждений и ученых в тематическом направлении создания процессов высокопроизводительного шлифования с устойчивыми во времени выходными показателями обработки, в особенности отечественные, и прежде всего опираются на всеобще признанный пионерским соответствующий опыт разработки метода АИШ в НТУ «ХПИ» (работы под руководством проф. М. Ф. Семко и проф. Н. К. Беззубенко, аспирантом которых и впоследствии соратником последнего автор имел честь быть, а также проф. М. Д. Узуняна).

Разработана и проверена практикой аналитическая модель управляемого и стабильного во времени процесса шлифования алмазным кругом на металлической связке с регулированием скорости износа связки путем соблюдения определенного соотношения скоростей ее износа и износа зерен круга за счет введения в зону резания дополнительной энергии в форме электрических разрядов по методу АИШ.

Выполненным новым теоретическим и процедурным разработкам характерны сближение и объединение с фундаментальной научной базой, созданной к настоящему времени в технологии, станочном и инструментальном обеспечении обработки материалов шлифованием.

Научные результаты работы развивают теоретический и практический опыт метода АИШ, создают соответствующие теоретические предпосылки для усовершенствования существующих и появления новых прогрессивных технологий шлифования, являются стимулятором дальнейшего развития систем подготовки производств и производственного реинжиниринга в украинском и зарубежном машиностроении.

Адекватность разработанного подхода к аналитическому моделированию и оптимизации процесса шлифования экспериментально подтверждена

применительно к обработке различных материалов: магнитотвердого, твердого сплава, закаленной и штамповой стали, теплостойкой наплавки. Результаты экспериментальных исследований, их анализ, обобщения и рекомендации составляют базу данных для повышения производительности, стабильности, энергоотдачи, качества и экономической эффективности АИШ.

Новые аналитико-синтетические возможности, появляющиеся благодаря выполненному развитию и обобщению теоретических и экспериментальных исследований, благоприятствуют дальнейшему совершенствованию метода АИШ и технических средств его базирования (шлифовальные станки) и обеспечения (шлифовальные круги).

Впервые разработана электронная конструкторская документация на модернизацию универсальных станков шлифовальной группы для реализации АИШ в изготовлении изделий с плоскими и круглыми поверхностями. Разработка выполнена и апробирована в опытных образцах применительно к популярным в промышленности базовым моделям линеек круглошлифовальных (ЗБ12) и плоскошлифовальных (ЗГ71) станков. Разработанная электронная конструкторская документация поддерживается современной САПР Аскон Компас-3D V15 и вошла в состав заключительного научно-технического отчета [4] с ответственным исполнением автора, являющегося непосредственным разработчиком основной сборочной и части детализовочной чертежной документации.

Выполненная разработка электронной конструкторской документации на модернизацию шлифовальных станков для АИШ, ориентированная на реинжиниринг использующих их механообрабатывающих производств, может быть также предметом коммерческого предложения неисключительной лицензии их предприятиям-производителям, особенно с теми же базовыми моделями станков, то есть с первоочередным предложением армянскому АОТ «Шлифстанок», литовскому АО «Винграй», белорусскому холдингу «Белстанкоинструмент».

Этим предприятиям может быть предоставлена возможность конструкторски обеспеченного развития модельного ряда выпускаемого оборудования, расширения его технологических возможностей, в том числе поставкой по специальному заказу за отдельную плату вместе со станком соответствующей модернизационной оснастки, и (или) предоставления потребителям выпускаемых станков разработанных в НТУ «ХПИ» спецификаций и чертежей этой модернизации, в том числе их включением в состав руководств по эксплуатации.

Основное содержание концентрированных монографией исследовательской работы и ее результатов предшествующе широко представлено автором научной и профессиональной общественности в специализированных научных изданиях, на научно-практических конференционных и выставочных форумах. Результаты внедрены в промышленность.

Под руководством инициаторов и первых организаторов создания и исследования метода АИШ М. Ф. Семко и Н. К. Беззубенко автор непосредственно участвовал в реализации принятых в 1976-1979 гг. решений ГКНТ СССР по развитию этой разработки в государственном масштабе, начиная с исследования и подготовки к проверке в производстве технологического процесса АИШ твердосплавных изделий [103].

В 80-е годы автор четырежды премировался за разработку и внедрение новой техники и технологий АИШ. Приказом ХПИ от 16.11.1981 г. № 2050 на основании приказа министра станкостроительной и инструментальной промышленности СССР от 11.09.1981 г. № 578 о премировании за разработку, освоение и выпуск особо важных и высокоэффективных видов оборудования и освоение принципиально нового технологического процесса; приказами ХПИ от 30.06.1981 г. № 1085, от 26.06.1982 г. № 1047 и от 01.07.1983 г. № 1157 с формулировкой «за создание и внедрение новой техники», на аналогичных основаниях, т. е. за счет отчисленных Минстанкопромом СССР средств на

премирование разработчиков станков и технологий АИШ в Харьковском политехническом институте.

В ближайшей 15-ти летней ретроспективе объем авторских внедрений технико-технологических разработок метода АИШ в приведении к доллару США составил 20257,13 USD или 520708,06 грн. в приведенной курсовой оценке на 29.12.2016 р. по данным НБУ (<http://minfin.com.ua/currency>), таблица.

№ п/п	Организация – место внедрения	Дата доку- менти- рования	Вид эффекта: факт или прогноз	Общий объем годового эффекта / В том числе вклад автора* <sup>1</sup>		
				грн., по документу	долл. США, по курсу НБУ* <sup>2</sup>	грн., по курсу НБУ* <sup>3</sup>
00	ОАО «Харьковский станкостроительный завод»	22.05.2001	Факт	487560,00/ 55301,00	90083,70/ 10217,65	2422635,1/ 274784,92
00	ГП ХМЗ «ФЭД»	17.12.2008	Прогноз	134700,00/ 14966,67	17406,92/ 1934,10	468127,15/ 52014,14
00	НПКП «Механика»	11.12.2009	Прогноз	21500,00/ 10750,00	2692,04/ 1346,02	72397,53/ 36198,77
00	ГП ХМЗ «ФЭД»	28.12.2009	Прогноз	66020,00/ 16505,00	8288,24/ 2072,06	222897,02/ 55724,26
00	ГП Завод «Электротяж-маш»	29.11.2014	Факт	225000,00/ 56250,00	15030,79/ 3757,70	404225,51/ 101056,37
00	ИПМаш НАН Украины	02.12.2014	Прогноз	-	-	-
00	ООО «Кермет-У»	29.12.2016	Прогноз	25000,00/ 25000,00	929,60/ 929,60	929,60/ 929,60
Всего:				959780,00/ 178772,67	134431,29/ 20257,13	3591211,8/ 520708,06
<i>В том числе</i>						
По годовой практике (годовой факт):				712560,00/ 111551,00	105114,49/ 13975,35	2826860,6/ 375841,29
По пробной практике (годовой прогноз):				247220,00/ 67221,67	29316,80/ 6281,78	764351,2/ 144866,77

\*<sup>1</sup> По выделенному участию или равномерно распределенный между участниками

\*<sup>2</sup> На дату документирования

\*<sup>3</sup> На 29.12.2016 р.

Разработки в направлении дальнейшего исследования и развития метода АИШ являются современно привлекательными для вложения в них инвестиций. Среднее ожидание полной окупаемости бюджетирования выполненной специализированной прикладной разработки по проблематике АИШ [4], рассчитанное по производственным прогнозам харьковских государственных предприятий «Электротяжмаш», машиностроительный завод «ФЭД» и «Завод им. В. А. Малышева», составляет 2,5 года.

Важнейшим внедрением результатов выполненных исследований и разработок является дальнейшее развитие интеллектуализации образовательной и научной деятельности, процессов проектирования и производства в Украине, обеспечение конкурентоспособности соответствующих отечественных продуктов через усовершенствование подготовки и переподготовки (или содействие такой подготовке и переподготовке) инженерных и научных кадров. Выполнение работы оказало заметную поддержку развитию учебного процесса. В ближайшей пятилетней ретроспективе ее отдельные результаты отражены в 7-ми совместных со студентами-магистрантами научных публикациях автора.

Материалы теоретических и экспериментальных исследований АИШ, практические рекомендации по их результатам в 2012-2016 гг. представлены автором в 61-й самостоятельной и 36-ти коллективных публикациях, в том числе 16-ти – в специализированных научных изданиях Украины, 4-х – в зарубежных научных журналах, 54-х – в изданиях научных форумов в Украине, 23-х – в изданиях научных форумов за рубежом. Помимо 15-ти ранее вошедших в список использованных в монографии источников, это также труды [284-365], отчасти содержащие как дополнительную к опубликованной здесь информацию, так и подобную, в различных презентационных конференционных интерпретациях учитывающую прикладную тематическую специфику конкретных конференционных вызовов, но в основном это не вошедшие в данное издание и ожидающие будущих монографических освещений и обобщений разработки, среди которых связанные со



станкоинструментальными решениями специальной адаптации конвенционального оборудования и инструментов алмазно-абразивной обработки для АИШ [285, 286, 292, 303, 308, 310, 311, 314, 316, 319-322, 331, 333, 336, 338, 339, 341-345, 348, 352, 356, 365]; влиянием скорости АИШ на выходные показатели обработки, природой этого влияния и перспективами высокоскоростного АИШ [299, 300, 302, 307, 347]; микрогеометрическими перспективами поверхностной инженерии инновационными структурными решениями внутриоперационной технологической маршрутизации АИШ [287, 289, 315, 323, 332, 337, 353, 354, 362, 364]; сродством структурных эффектов АИШ и SPS, предоставляемых физикой инициирования, протекания и наследственностью электрических разрядов, с возможностями сквозной оптимизации процесса изготовления в жизненном цикле заготовительного (SPS) и окончательного (АИШ) формообразования деталей из порошковых материалов высокой функциональности [290, 294, 312, 317, 350, 351, 359, 363].

Автор неоднократно представлял разработки АИШ, выполненные им самостоятельно и совместно, научному совету по надежности и долговечности в Университете имени Константина Бранкузи (Таргу-Жиу, Румыния) [6, 295-297], по сути являющемуся научным советом одноименного и широко наукометрируемого в международных информационных базах журнала «Надежность и долговечность» («*Fiability & Durability*», [http://www.utgjui.ro/rev\\_mec](http://www.utgjui.ro/rev_mec)) и программным комитетом международного симпозиума «Долговечность и надежность механических систем» (SYMECH, <http://www.utgjui.ro/cercetare/fdsm/Symposium>), членами которых с их учреждения в 2008 году автор имеет честь состоять по персональному приглашению румынской стороны как делегату Украины, наряду с представителями известных научных школ США (М. Enachescu, Калифорнийский университет в Беркли), Канады (R. Botez и I. Paraschivoiu, Политехническая школа в Монреале), Греции (G. Metaxas, Институт

технологического образования в Пирее), Сербии (М. Radovanović, Университет в Нише), Молдовы (V. Dulgheru, Технический университет в Кишиневе), а также в НИЯУ «МИФИ» (Москва, Россия) [349, 350], сертифицированным приглашенным лектором которого автор является с 2013 года (<http://lemc-lab.mephi.ru>).

Кроме показанных выше форумных презентаций в румынском Университете имени Константина Бранкузи и российском НИЯУ «МИФИ», в период 2012-2016 гг. выполненная автором работа по исследованию и усовершенствованию практики метода АИШ в обработке материалов высокой функциональности, популяризации основ, истории успеха и перспектив развития этой технологии, представлена еще на 22-х научных форумах, в том числе на 20-ти международных в украинских Затоке – «Инженерия поверхности и реновация изделий»: [328] (2015 г.), Кременчуге – «Машиностроение – глазами молодых»: [310] (2013 г.), Одессе – «Высокие технологии: тенденции развития»: [329-334] (2015 г.), «Качество, стандартизация, контроль: теория и практика»: [313] (2014 г.), [335] (2015 г.), «Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении»: [343] (2016 г.), Сваляве – «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте»: [234, 303] (2013 г.), [236, 311] (2014 г.), [338] (2016 г.), Харькове – «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье»: [298-300] (2012 г.), [304-309] (2013 г.), [217, 314-321] (2014 г.), [5, 323-327] (2015 г.), [339-342] (2016 г.), «Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве»: [74] (2012 г.), [312] (2014 г.), [336, 337] (2015 г.), [344, 345] (2016 г.), Ялте – «Инженерия поверхности и реновация изделий»: [301] (2012 г.), [216] (2013 г.); а также 15-ти зарубежных в венгерском Мишкольце – «microCAD»: [346] (2012 г.), [235, 348] (2013 г.) и российских Кемерово – «Инновации в машиностроении» (ИнМаш-2015): [363] (2015 г.), Курске – «Современные инновации в науке и технике»: [347] (2012 г.), [353] (2014 г.), «Современная наука: проблемы, инновации, решения»: [351]

(2014 г.), [362] (2015 г.), [365] (2016 г.), «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации»: [218, 352] (2014 г.), [355, 364] (2015 г.), «Инновации, качество и сервис в технике и технологиях»: [354] (2014 г.), [359, 360] (2015 г.), «Техника и технологии: пути инновационного развития»: [75] (2014 г.), «Прогрессивные технологии и процессы»: [356-358] (2015 г.), Самаре – «Научно-техническое творчество: проблемы и перспективы»: [361] (2015 г.).

Следующая из приведенного выше послужного списка конференционных форумов 2012-2016 гг. с представительским участием автора высокая активность использования им платформ основанных НТУ «ХПИ» международного научно-технического семинара по высоким технологиям в машиностроении «Интерпартнер» и международной научно-практической конференции «MicroCAD» связана с возможностями, предоставляемыми участием автора в их организационных структурах с основания этих форумов соответственно в 1992 году («Интерпартнер») и в 1993 году («MicroCAD»).

При организационном и исполнительском участии автора метод АИШ в целом, соответствующие ему научные и внедренческие разработки, образцы шлифованных деталей и алмазно-абразивных инструментов прямого и чашечного профиля с развитым режущим рельефом, в том числе особо крупнозернистых (со средним размером зерен из дробленых синтетических поликристаллических алмазов типа «баллас» и поликристаллического кубического нитрида бора типа «гексанит» 1 мм и выше), неоднократно представлялись и отмечались престижными наградами на различных международных, национальных и региональных выставочных форумах в Украине. В 2011 г. в рамках проводимой под эгидой Кабинета Министров Украины и посвященной 20-летию независимости страны общегосударственной акции «Барвыста Украина» метод АИШ отмечен как лучший отечественный научный товар.

В 2016 году проект продолжения исследований в НТУ «ХПИ» в направлении расширенной применимости метода АИШ «Разработка конструкционно-технологических основ и технических решений алмазных инструментов повышенной функциональности в реализации электрофизикохимических методов шлифования», предложенный автором с использованием 26-ти указанных экспертам собственных опубликованных источников, в том числе 12-ти – без соавторов, при поддержке наработками и коллективно опубликованными источниками докторов технических наук, профессоров А. И. Грабченко (руководитель проекта, 21 источник, в том числе 1 – с наукометрированием в базах данных Scopus) и В. А. Федоровича (27 источников, в том числе 2 – с наукометрированием в базах данных Scopus), кандидата технических наук, старшего научного сотрудника Е. К. Севидовой (ответственный исполнитель проекта, 13 источников, в том числе 2 – с наукометрированием в базах данных Scopus) и младшего научного сотрудника Д. О. Федоренко (8 источников), а также доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника, начальника лаборатории ННЦ «ХФТИ» НАН Украины В. Е. Стрельницкого (37 источников, в том числе 2 – научные монографии и 17 – с наукометрированием в базах данных Scopus), получил экспертный статус разработки высокого уровня и признан лучшим из 44-х проектов-претендентов по секции «Машиностроение» Научного совета Министерства образования и науки Украины, приоритетным к финансированию из государственного бюджета в 2017-2018 гг.

Предполагается, что ближние и отдаленные следствия результатов представленной автором работы, адаптированных к потребностям практики в разработанных рекомендациях, базах данных и конструкторской документации, подлежат последовательному и внимательному дальнейшему изучению, анализу и учету при формировании программ развития последующих исследований и их выполнении в научной школе физики процессов резания

НТУ «ХПИ», в ИПМаше НАН Украины и другими научными коллективами созидания машиностроительной будущности.

Наряду с теоретическим и практическим решением задач утилитарного производственного прагматизма в дальнейшем следует развивать и совместно изучать фундаментальные основы теории резания-шлифования и электрического разряда в рабочих средах его осуществления, добиваясь целенаправленно углубленной научной и практической интеграции электроразрядных явлений в организацию устойчивых рабочих процессов формообразования материалов, в особенности труднообрабатываемых, абразивными инструментами, в том числе сверхтвердыми, на заданном уровне обеспечения качества обработки.

Создание в Украине метода АИШ, развитие и систематизация теории и практики этого метода повышают возможности автоматизации, ускорения и оптимизации конструкторско-технологических решений для соответствующих машиностроительных производств, помогают преодолеть обычную ограниченность реальной практики традиционным шлифованием, обеспечивают необходимые к использованию в автоматизированных системах подготовки гибких производств теоретические основания для виртуального синтеза и материального воплощения технологических процессов высокой прогнозируемости, надежности и эффективности.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Переверзев, П. П. Теория и методика расчета оптимальных циклов обработки деталей на круглошлифовальных станках с программным управлением : Дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 – Технология машиностроения / П. П. Переверзев; Южно-Урал. гос. ун-т. – Челябинск, 1999. – 295 с. – Доступ : <http://www.dissercat.com/content/teoriya-i-metodika-rascheta-optimalnykh-tsiklov-obrabotki-detalei-na-krugloshlifovalnykh-sta>.
2. Державна програма активізації розвитку на 2013-2014 роки. Затв. Постановою Кабінету Міністрів України від 27 лютого 2013 р. № 187. // Урядовий кур'єр. – 10 квітня 2013. – № 67. – С. 5-6.
3. Концепція Загальнодержавної цільової економічної програми розвитку промисловості на період до 2020 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17 липня 2013 р. № 603-р. // Урядовий кур'єр. – 19 вересня 2013. – № 170. – С. 16.
4. Грабченко, А. Разработка технических решений специальной модернизации универсальных станков и технологических баз данных для алмазно-искрового шлифования труднообрабатываемых материалов : Отчет о НИР (заключит.) / А. Грабченко, Ю. Гуцаленко, И. Пыжов и др.; рук. темы А. Грабченко, отв. исп. Ю. Гуцаленко. – № гос. рег. 0113U000425; инв. № 0215U001303. – Нац. техн. ун-т "Харк. политехн. ин-т". – Харьков, 2014. – 518 с.
5. Пижов, І. М. Мотивація та завдання за проектом М2243 НТУ «ХП» щодо удосконалення верстатoinструментальних систем плоского торцевого шліфування (2015-2016 рр.) / І. М. Пижов, Ю. Г. Гуцаленко, О. К. Севідова, О. В. Руднєв, В. В. Івкін // Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXIII міжнар. наук.-практ. конф. (20-22 трав. 2015 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – Ч. I. – С. 123.
6. Gutsalenko, Yu. Exploitative destruction features for detonation ultra-dispersed diamonds of initial metallic protection for abrasive powder grains to diamond-spark grinding tools / Yu. Gutsalenko, C. Iancu, S. Bratan // *Fiability & Durability* [ISSN

1844-640X; Târgu-Jiu: "C-tin Brâncuși" Univ. of Tg-Jiu]. – 2015. – Supplement No. 1[(14), [http://www.utgjiu.ro/rev\\_mec/?page=curent&nr=2015-01.Supliment](http://www.utgjiu.ro/rev_mec/?page=curent&nr=2015-01.Supliment)]. – PP. 3-8.

7. Гуцаленко, Ю. Г. Модернизация эксплуатируемых универсальных шлифовальных станков и возможности современного развития модельного ряда станкостроения для реализации алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко, В. В. Ивкин, А. В. Руднев // Різання та інструмент в технологічних системах [ISSN 2078-7405]. – 2015. – Вип. 85. – С. 65-73.

8. Гуцаленко, Ю. Г. Особенности и возможности формирования микрогеометрии обработанной поверхности алмазно-искровым шлифованием / Ю. Г. Гуцаленко // Високі технології в машинобудуванні [ISSN 2078-7677]. – 2015. – Вип. 1 (25). – С. 50-58.

9. Петрушенко М. Чому університети приміряються до «академічного капіталізму» / М. Петрушенко // Урядовий кур'єр. 22 серпня 2014. – № 153. – С. 10.

10. Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні: Закон України від 8 вересня 2011 р. № 3715-VI // Урядовий кур'єр. – 8 жовтня 2011. – № 186. – С. 21.

11. Business Cycles since 1820: New International Perspectives from Historical Evidence / Ed. by Trevor J. O. Dick. – Cheltenham (UK), Northampton (MA, USA) : Edward Elgar, 1998. – 294 p.

12. Боровский, Г. В. Инструментальное производство в России / Г. В. Боровский. – М. : ВНИИинструмент, 2008. – 160 с.

13. Ли, К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – СПб. : Питер, 2004. – 560 с.

14. Весткемпер, Э. Введение в организацию производства / Э. Весткемпер, М. Декер, Л. Ендюби, А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок. Под общ. ред. А. И. Грабченко. – Харьков : НТУ „ХПИ”, 2008. – 376 с.

15. Степанов, М. В. Стратегия хозяйственного поведения корпораций США (на материалах машиностроения) / М. В. Степанов; отв. ред. В. А. Назаревский; АН СССР. Ин-т мировой экономики и междунар. отношений. – М. : Наука, 1990. – 143 с.
16. Japanese Views on Economic Development: Diverse Path to the Market / Ed. by K. Ohno and I. Ohno. – N.Y. : Routledge, 1998. – 332 p.
17. Шнайдер, Дитер И. Г. Введение в маркетинг технологий и высокотехнологичных товаров производственного назначения / Дитер И. Г. Шнайдер. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2003. – 454 с.
18. Крижний, Г. К. Стратегічний технологічний менеджмент / Г. К. Крижний. – Х. : НТУ „ХПІ”, 2003. – 448 с. – Рос.мовою.
19. Converging Technologies for Improving Human Performance: nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science: NSF/DOC – sponsored report / Ed. by Mihail C. Roco and William Sims Bainbridge. – Arlington, Virginia : National Science Fondation, June 2002. – 424 p. – <http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies/1/NBIC-report.pdf>.
20. Managing Nano-Bio-Info-Cogno Innivations: Converging Technologies in Society / Ed. by William Sims Bainbridge and Mihail C. Roco. – Dordrecht, Netherlands: Springer, 2005. – 398 p.
21. The World Economic Forum: The Global Competitiveness Report 2013 – 2014 : Country rankings [GCI]. – [http://www3.weforum.org/docs/GCR2013-14/GCR\\_Rankings\\_2013-14.pdf](http://www3.weforum.org/docs/GCR2013-14/GCR_Rankings_2013-14.pdf).
22. Technological readiness // The Global Competitiveness Report 2013-2014, Index of Data Tables, Pillar 9, pp. 509-516. – <http://reports.weforum.org/the-global-competitiveness-report-2013-2014> .
23. Innovation // The Global Competitiveness Report 2013-2014, Index of Data Tables, Pillar 12, pp. 533-540. – <http://reports.weforum.org/the-global-competitiveness-report-2013-2014> .



24. The World Bank : The International Comparison Program : Gross Domestic Product (GDP). – <http://www.worldbank.org>.
25. U.S. Census Bureau : People and Households: International Programs : Data : Country Rankings : Countries and Areas Ranked by Population : 2014. – <http://www.census.gov>.
26. Бакуль, В. Н. Справочник по алмазной обработке металлорежущего инструмента / В. Н. Бакуль, И. П. Захаренко, Я. А. Кункин, М. З. Мильштейн. – К. : Техника, 1971. – 208 с.
27. Бакуль, В. Н. Влияние ширины алмазноносного слоя на работоспособность кругов формы АЧК / В. Н. Бакуль, Е. С. Землянский // Синтетические алмазы. – 1972. – Вып. 3. – С. 16-20.
28. Внуков, Ю. Н. Исследование процесса высокопроизводительного шлифования быстрорежущих сталей кругами из дробленых сверхтвердых поликристаллов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 – процессы мех. и физ.-хим. обработки, станки и инструмент / Ю. Н. Внуков; Харьк. политехн. ин-т [вып.]; Тбилис. политехн. ин-т [защита]. – Тбилиси, 1977. – 21 с.
29. Грабченко, А. И. Некоторые особенности шлифования сверхтвердых поликристаллов алмазными кругами / А. И. Грабченко, В. В. Русанов, В. А. Федорович // Резание и инструмент. – 1979. – Вып. 22. – С. 122-126.
30. Захаренко, И. П. Рациональное использование сверхтвердых абразивных материалов в инструментальном производстве / И. П. Захаренко. – К. : Наук. думка, 1979. – 156 с.
31. Захаренко, И. П. Алмазная заточка твердосплавного инструмента совместно со стальной державкой / И. П. Захаренко, А. А. Шепелев. – К. : Наук. думка, 1976. – 219 с.
32. Лавриненко, В. І. Наукові основи шліфування інструментальних матеріалів із спрямованою зміною характеристик контактних поверхонь : Автореф. Дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти / В. І. Лавриненко; Ін-т надтв. матеріалів. – К., 2000. – 35 с.

33. Матюха, П. Г. Выбор длины электрода-инструмента при электроэрозионной правке шлифовальных кругов / П. Г. Матюха, В. И. Мартынов, В. П. Цокур // Резание и инструмент. – 1988. – Вып. 40. – С. 36-42.
34. Мишнаевский, Л. Л. Износ шлифовальных кругов / Л. Л. Мишнаевский. – К. : Наук. думка, 1982. – 192 с.
35. Новиков, Г. В. Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования деталей с высокопрочными покрытиями: Дис...канд. техн. наук : 05.02.08. – технология машиностроения / Г. В. Новиков; Харьков. Политехн. ин-т. – Харьков, 1989. – 210 с.
36. Новиков, Ф. В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: Дис...д-ра техн. наук: 05.02.08 – технология машиностроения; 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты / Ф. В. Новиков; Харьк. НПО «Прогресс» [вып.]; Одес. гос. политехн. ун-т [защита]. – Одесса, 1995. – 438 с.
37. Пасічний, О. О. Підвищення ефективності прецизійної алмазної обробки деталей типу “куля” з конструкційної кераміки : Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти / О. О. Пасічний; Ін-т надтв. матеріалів. – К., 2002. – 22 с.
38. Попов, С. А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С. А. Попов, Н. П. Малевский, Л. М. Терещенко. – М. : Машиностроение, 1977. – 263 с.
39. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні : Навч. посібник / За ред. А.І. Грабченка. – Х. : ХДПУ, 1999. – 436 с.
40. Рыбицкий, В. А. Опыт внедрения алмазного шлифования деталей с защитными покрытиями / В. А. Рыбицкий. – Киев: Об-во “Знание” УССР, 1987. – 23 с.
41. Рыжов, Э. В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Э. В. Рыжов, С. А. Клименко, О. Г. Гуцаленко. – Киев: Наук. думка, 1994. – 180 с.

42. Сагарда, А. А. Алмазно-абразивная обработка деталей машин / А. А. Сагарда, И. Х. Чеповецкий, Л. Л. Мишнаевский. – Киев : Техніка, 1974. – 179 с.
43. Семко, М. Ф. Электроалмазное шлифование инструментальных материалов / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, Н. В. Левченко, А. Ф. Раб. – Киев: Вища шк., 1974. – 120 с.
44. Семко, М. Ф. Эльборовое шлифование быстрорежущих сталей / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, М. Я. Зубкова, А. Ф. Раб, В. И. Воронков. – Харьков : Вища школа, 1974. – 136 с.
45. Семко, М. Ф. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, М. Г. Ходоревский. – Харьков : Вища шк., 1980. – 191 с.
46. Семко, М. Ф. Основы алмазного шлифования / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, А. Ф. Раб, М. Д. Узунян, М. С. Пивоваров. – Киев: Техніка, 1978. – 192 с.
47. Синтетические алмазы в машиностроении / Под ред. В. Н. Бакуля. – Киев: Наук. думка, 1976. – 351 с.
48. Синтетические сверхтвердые материалы : В 3-х т. – Т. 3 : Применение синтетических сверхтвердых материалов / Редкол.: Н.В. Новиков (отв. ред.) и др. – Киев: Наук. думка, 1986. – 280 с.
49. Рыжов, Э. В. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э. В. Рыжов, А. А. Сагарда, В. Б. Ильицкий, И. Х. Чеповецкий. – К. : Наук. думка, 1979. – 244 с.
50. Захаренко, И. П. Алмазные инструменты и процессы обработки / И. П. Захаренко. – К. : Техніка, 1980. – 212 с.
51. Захаренко, И. П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента / И. П. Захаренко. – К. : Наук. думка, 1981. – 300 с.
52. Захаренко И.П. Круглое алмазное шлифование многолезвийного твердосплавного инструмента без применения кругов из КЗ / И. П. Захаренко, Н. П. Винников, В. М. Эпштейн // Синтетические алмазы. – 1970. – Вып. 6 (12).

– С. 41-43.

53. Захаренко, И. П. Алмазно-электролитическая обработка инструмента / И. П. Захаренко, Ю. Я. Савченко. – К. : Наук. думка., 1977. – 223 с.

54. Якимов, А. В. Качество и производительность абразивно-алмазной обработки: Учеб. пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, А. А. Якимов – Одесса : ОГПУ, 1999. – 212 с.

55. Кащук, В. А. Справочник заточника / В. А. Кащук, А.Д. Мелехин, Б. П. Бармин. – М. : Машиностроение, 1982. – 232 с.

56. Новиков, Ф. В. Механика круглого алмазного шлифования изделий с прерывистыми поверхностями и пути ее оптимального управления: Автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.03.01 – процессы мех. и физ.-хим. обработки, станки и инструмент / Ф. В. Новиков; Харьков. политехн. ин-т [вып.]; Ин-т сверхтвердых материалов АН Украины [защита] – Киев, 1984. – 21 с.

57. Погребной, Н. А. Качество обработки твердых сплавов на основе карбида вольфрама при алмазном шлифовании / Н. А. Погребной, С. М. Шевченко, В. П. Ткаченко, С. А. Дитиненко // Вісн. Харків. держ. техн. ун-ту сільс. гос-ва. “Підвищення надійності відновлюємих деталей машин.” – Х. : ХДТУСГ, 2003. – Вип. 18. – С. 183-190.

58. Шепелев, А. А. Интенсификация процессов шлифования инструментальных материалов кругами из синтетических алмазов и кубического нитрида бора: Автореф. дис....докт. техн. наук: 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты / А. А. Шепелев; Ин-т сверхтвердых материалов [вып.]; Нац. техн. ун-т “ХПИ” [защита]. – Харьков, 2002. – 36 с.

59. Беззубенко, Н. К. Место нового процесса алмазно-абразивно-искрового шлифования в ряду комбинированных электрохимических и электротехнических методов обработки / Н. К. Беззубенко // Резание и инструмент. – 1974. – Вып. 9. – С. 133-139.

60. Беззубенко, Н. К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических

разрядов : Дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты / Н. К. Беззубенко; Харьк. гос. политехн. ун-т. – Харьков, 1996. – 468 с.

61. Грабченко, А. И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования / А. И. Грабченко. – Харьков : Вища шк. Изд-во при Харьк. ун-те, 1985. – 184 с.

62. Гродзинский, Э. Я. Станки и оснастка для шлифования с электрической активацией рабочей поверхности круга / Э. Я. Гродзинский, И. В. Голубев, А. Т. Маковицкая // Станки и инструмент. – 1981. – № 4. – С 10-11.

63. Пахалин, Ю. А. Алмазное контактно-эрозионное шлифование / Ю. А. Пахалин. – Л. : Машиностроение, Ленигр. отд-ние, 1985. – 178 с.

64. Подураев, В. Н. Технология физико-химических методов обработки / В. Н. Подураев. – М. : Машиностроение, 1985. – 264 с.

65. Палей, М. М. Технология шлифования и заточки режущего инструмента / М. М. Палей, Л. Г. Дибнер, М. Д. Флид. – М. : Машиностроение, 1988. – 288 с.

66. Узунян, М. Д. Алмазно-искровое шлифование твердых сплавов / М. Д. Узунян. – Х. : НТУ"ХП", 2003. – 359 с.

67. Грабченко, А. И. Анализ методов формообразования рабочей поверхности шлифовальных кругов на такопроводных связках / А. И. Грабченко, В. Л. Доброскок, Я. Н. Гаращенко // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. НТУ "ХП". – Х., 2002. – Вип. 1 (5). – С. 82-93.

68. Семко, М. Ф. Способ абразивной обработки металлов : а. с. № 494130 (СССР) : МКИ<sup>1</sup> В 24 в 1/00, В 23 р 1/10 / М. Ф. Семко, Н. К. Беззубенко, И. С. Сальтевский, А. Т. Калашников. – № 1828222/25-8; заявл. 12.09.72; опубл. 25.08.76. Бюл. № 31.

69. Калашников, А. Т. Исследование физических особенностей и технологических возможностей процесса алмазно-искрового шлифования : Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 – процессы мех. и физ.-хим. обработки, станки и инструмент / А. Т. Калашников; Харьк. политехн. ин-т

[вып.]; МВТУ им. Н. Э. Баумана [защита]. – М., 1976. – 16 с.

70. Беззубенко, Н. К. К вопросу выбора режима работы режущих зерен при алмазно-искровом шлифовании / Н. К. Беззубенко // Резание и инструмент. – 1979. – Вып. 22. – С. 3-6.

71. Матюха, П. Г. Теоретические и экспериментальные исследования кинематики процесса и рельефа круга при алмазно-искровом шлифовании: Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты / П. Г. Матюха; Донец. политехн. ин-т [вып.]; МВТУ им. Н. Э. Баумана [защита]; науч. рук. М. Ф. Семко и Н. К. Беззубенко [Харьков. политехн. ин-т]. – М., 1980. – 16 с.

72. Иванов, Н. П. Интенсивность электроэрозии алмазных кругов при использовании источника постоянного тока / Н. П. Иванов, Л. Е. Кобзарь // Резание и инструмент. – 1984. – Вып. 31. – С. 26-31.

73. Фадеев, В. А. Алмазное шлифование твердых сплавов с введением в зону резания дополнительной энергии постоянного тока : Дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты / В. А. Фадеев; Харьк. гос. политехн. ун-т. – Харьков, 1995. – 273 с.

74. Гуцаленко, Ю. Г. Алмазно-искровое шлифование: обзор сорокалетия разработки харьковской научной школы физики процессов резания / Ю. Г. Гуцаленко // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве : Тр. 18-й междунар. науч.-практ. конф., 5-6 дек. 2012 г. – Харьков : ГП ХМЗ «ФЭД», 2012. – С. 79-88.

75. Гуцаленко, Ю. Г. Исторический опыт и современные перспективы алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Техника и технологи : пути инновационного развития : Сб. науч. тр. 4-ой междунар. науч.-практ. конф. 30 июня 2014 г., посвящ. 50-летию Юго-Зап. гос. ун-та, г.Курск, Россия. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – С. 264–270.

76. Израйлович, М. Я. Оптимизация процессов механической обработки алмазным и твердосплавным инструментом / М. Я. Израйлович. – М. :

ВНИИТЭМР, 1985. – 44 с.

77. Корчак, С. Н. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов : Учебник / С. Н. Корчак, А. А. Кошин, А. Г. Ракович, Б. И. Сеницын; под общ. ред. С. Н. Корчака. – М. : Машиностроение, 1988. – 352 с.

78. Fedorovych, V. Improving the Efficiency of Using Diamond Grinding Wheels on the Organic Binder by Calculating the Rational Structure and Introduction of Ultradispersed Diamond / V. Fedorovych, Y. Babenko, D. Romashov, V. Rusanov // XXXVII. MicroCAD International Scientific Conference University of Miskolc, 21-22 March, 2013. ISBN: 978-963-358-018-9 The CD contain the revised publications of the Conference. – 5 p.

79. Федорович, В. О. Моделирование процесса сверхскоростного шлифования сверхтвердых материалов / В. О. Федорович, Н. В. Рязанова-Хитровська // Міжнар. наук.-техн. конф. "Машинобудування – очима молодих". Кременчук, 30 жовт. – 1 листоп. 2013 р.: матеріали конф. – Кременчук: КрНУ ім. Михайла Остроградського, 2013. – С. 137-139.

80. Пыжов, И. Н. Некоторые подходы к повышению ресурса работы алмазных карандашей / И. Н. Пыжов, В. О. Федорович, Н. В. Рязанова-Хитровська, Н. В. Крюкова, В. Г. Клименко // Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Вип. 9. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – С. 134-141.

81. Ромашов, Д. В. Исследование прочностных свойств конструкции круга для высокоскоростного алмазного шлифования / Д. В. Ромашов, Д. О. Федоренко, В. А. Федорович // Високі технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Вип. 1(23) – Х. : НТУ «ХП», 2013. – С. 150-155.

82. Ромашов, Д. В. Теоретическое определение рациональных условий изготовления кругов для алмазного сверхскоростного шлифования / Д. В. Ромашов, Д. О. Федоренко, В. А. Федорович // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2013. – Вып. 83. – С. 236-247.

83. Федоренко, Д. О. Моделирование процесса спекания алмазных кругов для работы в режиме самозатачивания / Д. О. Федоренко, Д. В. Ромашов, В. А. Федорович // Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Вип. 8. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – С. 162-175.
84. Рязанова-Хитровская, Н. В. Моделирование процесса сверхскоростного шлифования сверхтвердых материалов / Н. В. Рязанова-Хитровська, В. О. Федорович // VII Університет. наук.-практ. студент. конф. магістрантів Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т» (26-28 бер. 2013 р.) : Матеріали конф. : у 3-х ч. – Ч. 1 – Х. : НТУ «ХП», 2013. – С. 63.
85. Чен, Лу. Підвищення працездатності правлячих алмазних олівців / Лу Чен, І. М. Пижов // VII Університет. наук.-практ. студент. конф. магістрантів Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т» (26-28 бер. 2013 р.) : Матеріали конф. : у 3-х ч. – Ч. 1 – Х. : НТУ «ХП», 2013. – С. 71.
86. Рязанова-Хитровская, Н. В. Моделирование процесса изготовления алмазного карандаша / Н. В. Рязанова-Хитровская, В. Г. Клименко, И. Н. Пыжов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXII міжнар. наук.-практ. конф. (15-17 жовт. 2014 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – Ч. I. – С. 154.
87. Romashov, D. V. Simulation of the effect of sintering on the quality of diamond grinding wheels / D. V. Romashov // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доп. XXII міжнар. наук.-практ. конф. (15-17 жовт. 2014 р., Харків). – У 4-х ч. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – Ч. I. – С. 152.
88. Федоренко, Д. О. Критерии выбора керамической связки для бездефектного спекания алмазных кругов / Д. О. Федоренко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXII міжнар. наук.-практ. конф. (15-17 жовт. 2014 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – Ч. I. – С. 169.
89. Romashov, D. V. Principles of 3D modeling of the production and application of diamond wheels for high-speed processing / D. V. Romashov // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXI міжнар.



наук.-практ. конф. (29-31 трав. 2013 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – Ч. I. – С. 148.

90. Ромашов, Д. В. Основи 3D моделювання виготовлення алмазних кругів для надшвидкісного шліфування / Д. В. Ромашов // Міжнар. наук.-техн. конф. "Машинобудування – очима молодих". Кременчук, 30 жовт. – 1 листоп. 2013 р.: матеріали конф. – Кременчук : КрНУ ім. Михайла Остроградського, 2013. – С. 131-132.

91. Рязанова-Хитровская, Н. В. Моделирование процесса сверхскоростного шлифования сверхтвердых материалов / Н. В. Рязанова-Хитровская // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXI міжнар. наук.-практ. конф. (29-31 трав. 2013 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – Ч. I. – С. 151.

92. Федоренко, Д. О. Моделювання процесу спікання алмазних кругів, здатних до самозаточування при шліфуванні / Д. О. Федоренко // Міжнар. наук.-техн. конф. "Машинобудування – очима молодих". Кременчук, 30 жовт. – 1 листоп. 2013 р. : матеріали конф. – Кременчук : КрНУ ім. Михайла Остроградського, 2013. – С. 103-104.

93. Федоренко, Д. О. Оптимізація процесу шліфування в режимі самозаточування / Д. О. Федоренко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXI міжнар. наук.-практ. конф. (29-31 трав. 2013 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – Ч. I. – С. 166.

94. Ромашов, Д. В. Создание методологии динамического 3D моделирования сверхскоростного шлифования сверхтвердых алмазно-композиционных материалов / Д. В. Ромашов // Машинобудування України очима молодих : прогресивні ідеї – наука – виробництво : тези доповідей XIV Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції. 27-31 жовтня 2014 р., м. Суми. – Суми : Вид-во СумДУ, 2014. – С. 80-81.

95. Рязанова-Хитровская, Н. В. Некоторые подходы к повышению работоспособности алмазных карандашей и выглаживателей / Н. В. Рязанова-

Хитровская, И. Н. Пыжов // *Машинобудування України очима молодих : прогресивні ідеї – наука – виробництво : тези доповідей XIV Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції. 27-31 жовтня 2014 р., м. Суми. – Суми : Вид-во СумДУ, 2014. – С. 82-83.*

96. Федоренко, Д. О. Методологические и технологические аспекты изготовления и эксплуатации алмазных кругов / Д. О. Федоренко // *Машинобудування України очима молодих : прогресивні ідеї – наука – виробництво : тези доповідей XIV Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції. 27-31 жовтня 2014 р., м. Суми. – Суми : Вид-во СумДУ, 2014. – С. 100-101.*

97. Семко М.Ф. О некоторых физических особенностях процесса резания алмазным инструментом // *Станки и режущие инструменты : Респ. межведомств. науч.-техн. сб. – Вып. 1. – Алмазная обработка материалов. – Харьков : Изд-во Харьк. гос. ун-та, 1966. – С. 3-9.*

98. Семко, М. Ф. Электроэрозионная правка алмазных кругов на металлических связках / М. Ф. Семко, Н. К. Беззубенко, Э. Б. Михайлуца // *Синтетические алмазы. – 1974. – Вып. 4. – С. 14-17.*

99. Семко, М. Ф. Интенсифицированный способ алмазно-искрового шлифования / М. Ф. Семко, Н. К. Беззубенко, И. С. Сальтевский, А. Т. Калашников // *Новые технологические процессы. – М. : ГосИНТИ. 1975. – Вып. 11-75. – С. 1-4.*

100. Беззубенко, Н. К. Интенсификация процесса шлифования и динамика работы алмазных зерен / Н. К. Беззубенко, М. Д. Узунян // *Синтетические алмазы – ключ к техническому прогрессу. – К. : Наук. думка, 1977. – С. 138–142.*

101. Семко, М. Ф. Разработки на уровень изобретений / М. Ф. Семко, Н. К. Беззубенко // *Ленинские кадры. – 31 августа 1979. – № 25. – С. 2.*

102. Беззубенко, Н. К. Процесс алмазно-искрового шлифования / Н. К. Беззубенко // Резание и инструмент : Респ. межвед. науч.-техн. сб. – Харьков : Вища шк. – 1981. – Вып. 26. – С. 39-42.
103. Беззубенко, Н. К. Разработать и проверить в производстве технологический процесс алмазного шлифования деталей из твердых сплавов с воздействием электрическими разрядами на режущую поверхность круга и обрабатываемую деталь, обеспечивающий повышение (в 2 раза) производительности труда и качества обработки, выдать рекомендации по внедрению этого процесса на машиностроительных предприятиях (Дополнит. задание Гос. ком. по науке и технике СССР, постановление № 80 от 3 мая 1979 г.): Отчет о НИР / Н. К. Беззубенко (рук. темы), Н. П. Иванов, Ю. Г. Гуцаленко, Н. Н. Серова, П. К. Скоробогатько. – № гос. рег. 80016180; Инв. № Б924882. – Харьк. политехн. ин-т; Проблемная науч.-исслед. лаб. физики процессов резания инструментами из сверхтвердых поликристалл. материалов. – Харьков, 1980. – 99 с.
104. Машинобудівний факультет. 125 років у складі ХПІ : монографія / За заг. ред. А. І. Грабченка і М. С. Степанова. – Х. : Вид-во «Курсор», 2010. – 212 с.
105. Коньшин, А. С. Шлифовальные станки в двенадцатой пятилетке / А. С. Коньшин // Механизация и автоматизация производства. – М. : Изд-во "Машиностроение". – 1987. – № 4. – С. 6-9.
106. Беззубенко, Н. К. Некоторые предпосылки и результаты разработки новых кинематических схем шлифовальных станков / Н. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т». Темат. вип. : Систем. аналіз, управління та інформац. технології. – 2001. – № 8. – С. 6-11.
107. Голубев, И. В. Круглое наружное шлифование со стабилизацией режущей способности токопроводящего инструмента электрическими разрядами : Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 – процессы механической и физ.-хим. обработки, станки и инструмент / И. В. Голубев; ЭНИМС. – М., 1985. – 17 с.

108. Васильев, В. С. Способ комбинированной обработки металлов токопроводящим абразивным инструментом : а. с. № 560725 (СССР) :, МКИ<sup>1</sup> В 23 р 1/10. / В. С. Васильев, Э. Я. Гродзинский, А. Л. Лившиц, Р. Б. Исакова, Л. С. Зубатова, М. Ш. Отто, А. Х. Гринберг. – № 2093187/08; заявл. 04.01.75; опубл. 05.06.77. Бюл. № 21.

109. Гродзинский, Э. Я. Способ обработки токопроводящим абразивным инструментом и устройство к шлифовальному станку для его осуществления : а. с. 811869 (СССР) : МКИ<sup>1</sup> В 23 р 1/10 / Э. Я. Гродзинский, Р. Б. Исакова, Л. С. Зубатова, А. Т. Маконовицкая, А. Х. Гринберг. – № 260771125-08; заявл. 03.05.78; опубл. 30.06.81. Бюл. №24.

110. Гродзинский, Э. Я. Технология и оборудование для алмазного электрошлифования / Э. Я. Гродзинский, И. В. Голубев, Р. Б. Исакова. – В кн. : Опыт применения совмещенных электрофизикохимических методов обработки в промышленности : Материалы краткосрочного семинара. – Ленинград, 1978. – С. 41-48.

111. Гродзинский, Э. Я. Новый процесс шлифования с электрической активацией и стабилизацией режущей способности кругов / Э. Я. Гродзинский, И. В. Голубев, А. Т. Маконовицкая. – В кн. : Прогрессивные методы абразивной, алмазной и эльборной обработки в машиностроении : Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. конф. – Полтава, 1979. – С. 82-85.

112. Голубев, И. В. Алмазное электроэрозионное шлифование магнитов / И. В. Голубев, Э. Я. Гродзинский, А. Т. Маконовицкая. – Электрофизические и электрохимические методы обработки : Науч.-техн.реф. сб. – Вып. 10. – 1980. – С. 1-3.

113. Создание процесса абразивного и эльборного шлифования на токопроводящих связках с электрической активацией рабочей поверхности : Отчет. – М. : ЭНИМС, 1980. – 111 с. – № гос. регистрации 79049056, инвентар. № 929754.

114. Разработка комбинированных технологических процессов финишной обработки магнитных и безвольфрамовых твердых сплавов. Технологический регламент. – М. : ЭНИМС, 1981. – 162 с. № гос. регистрации 81055061, инвентар. № 02823029343.
115. Исакова, Р. Б. Алмазное электроэрозионное плоское и круглое наружное шлифование / Р. Б. Исакова, И. В. Голубев, Ф. Ф. Редько. – В кн. : Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов : Материалы семинара. Москва, 1981. – С. 47-52.
116. Гродзинский, Э. Я. Абразивное электроэрозионное шлифование: Методические рекомендации / Э. Я. Гродзинский, Р. Б. Исакова, Л. С. Зубатова, И. В. Голубев, Ф. Ф. Редько. – М. : ЭНИМС, 1981. – 26 с.
117. Гродзинский, Э. Я. Управление режущей способностью алмазных кругов с помощью электрических разрядов / Э. Я. Гродзинский, И. В. Голубев, А. Т. Крапивко. – Станки и инструмент. – 1982. – № 6. – С. 32-33.
118. Голубев, И. В. Особенности алмазного электроэрозионного круглого шлифования / И. В. Голубев, А. И. Стебаев, Э. Я. Гродзинский, Крапивко А. Т. // Алмазы и сверхтвердые материалы. – 1982. – Вып. 6. – С. 5-6.
119. Гродзинский, Э. Я. Электрохимическая и электроэрозионная абразивная обработка / Э. Я. Гродзинский, Л. С. Зубатова. // Станки и инструмент. – 1982. – № 3. – С. 28-29.
120. Голубев, И. В. Влияние величины межэлектродного зазора на технологические показатели алмазно-электроэрозионного шлифования при управлении режущей способностью круга в автономной зоне / И. В. Голубев, Э. Я. Гродзинский, А. И. Стебаев, Крапивко А. Т. – Электрофизические и электрохимические методы обработки : Науч.-техн. реф. сб. – 1983. – Вып. 5. – С. 1-2.
121. Голубев, И. В. Шлифование с автоматической стабилизацией режущей способности круга / И. В. Голубев, Э. Я. Гродзинский, В. К. Свешников, А. И. Стебаев // Станки и инструменты. – 1984. – № 1. – С. 20-22.

122. Кобзарь, Л. Е. Прогрессивное алмазно-искровое шлифование / Л. Е. Кобзарь, В. А. Фадеев, Н. К. Беззубенко. – Харьков : ХГПУ – ХНПО «ФЭД», 1995. – 152 с.
123. Набока, Е. В. Интенсификация алмазно-искрового шлифования ультразвуковыми колебаниями / Е. В. Набока // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 1997. – Вып. 51. – С. 186-190.
124. Новиков, Ф. В. Эффективность применения алмазного электроэрозионного шлифования / Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, Ю. Г. Гуцаленко // В кн. : Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В 10-ти томах. – Т. 6 : Качество обработки деталей машин. – Одесса : ОНПУ, 2003. – С. 171-220.
125. Новиков, Ф. В. Оптимизация параметров энергетически равновесного процесса алмазного шлифования / Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, Ю. Г. Гуцаленко // В кн. : Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В 10-ти томах. – Т. 9 : Проектирование технологических процессов в машиностроении. – Одесса : ОНПУ, 2005. – С. 477-509.
126. Гуцаленко, Ю. Г. Доцільність і особливості організації торцевого планетарного шліфування у електрофізикохімічних технологіях / Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Харк. нац. техн. ун-ту сіл. госп-ва. – 2010. – Вип. 106 : Техн. сервіс АПК, техніка та технології у с.-г. машинобудуванні. – С. 134-140.
127. Матюха, П. Г. Научные основы стабилизации выходных показателей алмазного шлифования с помощью управляющих воздействий на рабочую поверхность круга : Дис... д-ра техн. наук: 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты / П. Г. Матюха; Донец. гос. техн. ун-т [вып.]; Харьк. гос. политехн. ун-т [защита]. – Донецк, 1995. – 456 с. + 169 с. прил.

128. Матюха, П. Г. Алмазне шліфування з електроерозійними діями на робочу поверхню круга / П. Г. Матюха, В. В. Полтавець. – Донецьк : ДонНТУ, 2006. – 164 с.
129. Полтавець, В. В. Оптимізація режимів алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 с учетом нестационарности процесса / В. В. Полтавець, П. Г. Матюха, В. В. Габитов // Сверхтвердые материалы. – 2013. – № 6. – С. 69-79.
130. Бурдин, А. В. Алмазное шлифование композиции ВК8-сталь 45 с управлением режущей способностью круга электроэрозионным способом / А. В. Бурдин, П. Г. Матюха // Сверхтвердые материалы. – 2013. – № 1. – С. 66-73.
131. Матюха, П. Г. Расчет параметров шероховатости шлифованной поверхности / П. Г. Матюха, Л. К. Терехова // Известия вузов, Сер. Машиностроение. – 1982. – Вып. 10. – С. 101-105.
132. Полтавець, В. В. Влияние явлений, сопровождающих процесс алмазного шлифования труднообрабатываемых материалов, на высотные параметры шероховатости обработанной поверхности / В. В. Полтавець, П. Г. Матюха, В. П. Цокур, В. Б. Стрелков // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. : Машинобудування і машинознавство. – 2012. – Вип. 9 (205). – С. 56-63.
133. Матюха, П. Г. Високопродуктивне шліфування ванадійових штампових та інструментальних сталей / П. Г. Матюха. – Донецьк : ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. – 222 с.
134. Матюха, П. Г. Влияние времени обработки на глубину алмазного шлифования по упругой схеме / П. Г. Матюха, В. В. Полтавець // Прогрессивные технологии и системы в машиностроении : Междунар. сб. науч. тр. – Донецк : ДонГТУ, 1998. – Вып. 5. – С. 117-121.
135. Матюха, П. Г. Определение оптимального усилия поджима образца к рабочей поверхности круга при шлифовании стали Р6М5Ф3 кругами из СТМ / П. Г. Матюха, В. В. Габитов // Сучасні технології в машинобудуванні : Зб. наук. пр. – Х. : НТУ «ХП», 2009. – Вип. 3. – С. 55-62.

136. Матюха, П. Г. Определение силы поджима комбинированного образца к режущей поверхности круга, ограниченной механической прочностью алмазных зерен / П. Г. Матюха, А. В. Бурдин // Сверхтвердые материалы. – 2011. – № 3. – С. 65-73.
137. Матюха, П. Г. Определение силы поджима образца к кругу, ограниченной температурой графитизации алмазных зерен / П. Г. Матюха, В. Б. Стрелков // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. : Машинобудування і машинознавство. – 2004. – Вип. 71. – С. 41-46.
138. Матюха, П. Г. Спосіб шліфування : Патент № 52776 Україна : МПК В24В 1/00, В24В 53/00, В23Н 5/04 / П. Г. Матюха, В. В. Полтавець, А. О. Гриньов, В. Б. Стрелков. – Опубл. 15.01.03. Бюл. № 1.
139. Беззубенко, Н. К. Алмазно-искровое шлифование: краткий обзор разработки харьковской научной школы физики процессов резания / Н. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко // Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. 18-19 трав. 2006 р., присвяч. 100-річчю з дня народження М. Ф. Семка. – Х. : Вид-во „Курсор”, 2006. – С. 60-66.
140. Фалалеев, А. П. Повышение эффективности комбинированного шлифования деталей из твердого сплава на автоматизированном оборудовании автоматизацией управления : Дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 – автоматизация технологических процессов / А. П. Фалалеев; Севастопол. гос. техн. ун-т. – Севастополь, 1997. – 195 с.
141. Стрельчук, Р. М. Визначення особливостей та раціональних умов алмазно-іскрового шліфування твердих сплавів з нанорозмірних зерен монокарбиду вольфраму : Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти / Р. М. Стрельчук; Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – Х., 2011. – 193 с.
142. Агу Коллінз Агу. Підвищення ефективності алмазно-іскрового шліфування твердих сплавів шляхом застосування технології мінімального змащування:



Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти / Агу Коллінз Агу; Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – Х., 2011. – 177 с.

143. Геворкян, Э. С. Плотные и пористые конструкционные материалы из нано- и субмикронных порошков WC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiC полифункционального назначения : Дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.11 – Технология тугоплавких неметаллических материалов / Э. С. Геворкян; Укр. акад. ж.-д. трансп. [вып.]; Нац. техн. ун-т «Харк. политехн. ин-т» [защита]. – Х., 2008. – 289 с.

144. Гуцаленко, Ю. Г. Определение рационального давления прессования при нанопорошковой электроконсолидации / Ю. Г. Гуцаленко // Високі технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Х. : НТУ «ХПІ», 2011. – Вип. 1 (21). – С. 50-61.

145. Марахтанов, М. Металл взрывается! / М. Марахтанов, А. Марахтанов // Наука и жизнь. – 2002. – № 4. – С. 16-19.

146. Гуцаленко, Ю. Г. Особенности электроэрозионного разрушения металлов при высокоскоростном алмазно-искровом шлифовании / Ю. Г. Гуцаленко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Матер. міжнар. наук.-практ. конф. 15-16 трав. 2003 р. – Х. : НТУ «ХПІ», 2003. – С. 17-26.

147. Дитиненко, С. А. Перспективы развития алмазно-искрового шлифования / С. А. Дитиненко, А. Г. Крюк, Р. М. Стрельчук // Вісн. НТУ «ХПІ». Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2012. – № 47(953). – С. 219-222.

148. Байкалов, А. К. Введение в теорию шлифования материалов / А. К. Байкалов. – К. : Наук. думка, 1978. – 207 с.

149. Байкалов, А. К. Вероятная оценка размеров среза и усилий резания на абразивных зернах при шлифовании / А. К. Байкалов // Синтетические алмазы. – 1978. – № 1. – С. 15-19.

150. Коновалов, В. А. Исследование влияния прочности алмазоудержания и

износостойкости металлических связок на работоспособность алмазноабразивного инструмента: Дис ... канд. техн. наук : 05.03.01 – процессы мех. и физ.-хим. обработки, станки и инструмент / В. А. Коновалов; Ин-т сверхтвердых материалов АН Украины. – К., 1974. – 150 с.

151. Химач, О. В. О характере распределения срезов при шлифовании / О. В. Химач, В. Ф. Коробка, Л. С. Григорова // Синтетические алмазы. – 1977. – № 6. – С. 60-63.

152. Иванов, Н. П. Электроэрозионное формирование высоты рельефа рабочей поверхности алмазных кругов при использовании источника постоянного тока / Н. П. Иванов // Резание и инструмент. – 1984. – Вып. 32. – С. 21-27.

153. Новиков, Ф. В. Технология и теория прецизионной обработки твердосплавных инструментов алмазными кругами на металлических связках / Ф. В. Новиков, С. А. Дитиненко // Тр. 8-й Междунар. науч.-техн. конф. «Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве». – Харьков : ХНПК «ФЭД», 2003. – С. 34-39.

154. Новиков, Ф. В. Тепловые и механические процессы при резании металлов: Учеб. пособие / Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, С. Г. Зимин, В. А. Вайсман – Одесса : ОГПУ, 1997. – 179 с.

155. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1 : Механика резания материалов. – Одесса : ОНПУ, 2002. – 580 с.

156. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4 : Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов. – Одесса : ОНПУ, 2002. – 802 с.

157. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Т. 6 : Качество обработки деталей машин. – Одесса : ОНПУ,

2003. – 716 с.

158. Якимов, А. В. Алмазная обработка: Учеб. пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, А. А. Якимов. – К. : ІЗМН, 1996. – 168 с.

159. Якимов, О. В. Високопродуктивне шліфування : Навч. посібник / О. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, О. О. Якимов. – К. : ІСДО, 1995. – 180 с.

160. ЗАО «Аскон» : [Официальный сайт ; г. Санкт-Петербург, Россия]. – Режим доступа : <http://ascon.ru>. – Дата обращения : 4 декабря 2014.

161. Создание теории унифицированной многопараметрической информационной базы для САД/САМ систем зубчатых зацеплений, инструментов и процессов зубообработки : Отчет о НИР (заключит.) / Нац. техн. ун-т «Харк. политехн. ин-т»; рук. Б. Перепелица и В. Доброскок; отв. исполн. Ю. Гуцаленко. – Харьков, 2009. – 452 с. – № ГР 0108U001445. – Инв. № 0210U001273.

162. Добротворский, С. С. Научные основы процесса лазерной правки шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов : Дис. ... докт. техн. наук : 05.03.07 – процессы лазерной и физико-технической обработки / С. С. Добротворский; Харьк. гос. политехн. ун-т (вып.); Нац. техн. ун-т Украины «Киев. политехн. ин-т» (защита); – Киев, 1996. – 327 с.

163. Набока, Е. В. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения электрических разрядов и ультразвуковых колебаний в зону резания : Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Е. В. Набока; Харьк. гос. политехн. ун-т. – Харьков, 1998. – 275 с.

164. Новиков, Ф. В. Об условиях самозатачивания алмазного круга / Ф. В. Новиков, Ю. Г. Гуцаленко // Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении : Межвуз. сб. науч. тр. – Пермь : Перм. политехн. ин-т, 1984. – С. 70-77.

165. Беззубенко, Н. К. Влияние связки на износ круга при алмазно-искровом шлифовании / Н. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко // Інформаційні технології :

наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Зб. наук. праць ХДПУ. – Вип. 8. – Х. : Харк. держ. політехн. ун-т, 2000. – С. 13-19.

166. Гуцаленко, Ю. Г. Влияние электрических режимов на расход алмазов в рабочих процессах алмазно-искрового шлифования с устойчивой режущей способностью инструмента / Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Харк. держ. політехн. ун-ту. Вип. 100 : Машинобудування. – Х. : ХДПУ, 2000. – С. 45-49.

167. Гуцаленко, Ю. Г. Основные физические характеристики управления рельефом рабочей поверхности шлифовального круга / Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Харк. держ. політехн. ун-ту : Зб. наук. праць. – Вип. 102 : Автоматика та приладобудування. – Х. : ХДПУ, 2000. – С. 30-42.

168. Гуцаленко, Ю. Г. Рациональное использование алмазных инструментов на металлических связках в производительных процессах шлифования высокопрочных сталей и сплавов / Ю. Г. Гуцаленко // Физические и компьютерные технологии : Тр. 10-й Междунар. науч.-техн. конф., 28-30 сент. 2004 г. – Харьков : ХНПК «ФЭД», 2004. – С. 63-66.

169. Кобзарь, Л. Е. Особенности применения алмазно-искрового шлифования в процессах высоких технологий / Л. Е. Кобзарь, Ю. Г. Гуцаленко, И. С. Сальтевский // Высокие технологии в машиностроении : Тез. докл. междунар. науч.-техн. семинара «Интерпартнер» 4-8 окт. 1992 г., г. Алушта. – Харьков : Харьк. политехн. ин-т, 1992. – С. 64-66.

170. Фадеев, В. А. Электроэрозионные процессы при алмазно-искровом шлифовании / В. А. Фадеев, Ю. Г. Гуцаленко, Н. К. Беззубенко // *Gepgyartastechnologia*, XXXV evf. – 1995. – № 7-8. – PP. 269-273.

171. Bezzubenko, N. Increase of diamond grinding efficiency by initiation of additional physical processes in cutting zone / N. Bezzubenko, Yu. Gutsalenko, V. Fadejev // Jubilee 20-th Scientific Symposium on Abrasive Machining. Poznan-Blazejewko, 15-17 Sept. – 1997. – PP. 109-112.

172. Беззубенко, Н. К. Расчет энергии электрических импульсов для эффективной реализации алмазно-искрового шлифования / Н. К. Беззубенко,

Ю. Г. Гуцаленко // Наука и социальные проблемы общества : человек, техника, технология, окружающая среда : Материалы междунар. науч.-практ. конф., Харьков, 14-16 мая 2001 г. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2001. – Ч. 5. – С. 3-8.

173. Гуцаленко, Ю. Г. Стойкость круга в рабочих процессах рационального стабильного шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т» : Зб. наук. пр. Тем. вип. : Технології в машинобудуванні. – 2005. – № 23. – С. 50-63.

174. Беззубенко, Н. К. Назначение электрических параметров алмазно-искрового шлифования / Н. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т» : Зб. наук. пр. – Вип. 4 : Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2001. – С. 3-8.

175. Новиков Ф. В. Разработка математической (аналитической) модели процесса алмазного шлифования / Ф. В. Новиков, Ю. Н. Кривошапка // В кн. : Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В 10-ти т. – Т. 8 : Оптимизация технологических процессов в машиностроении. – Одесса : ОНПУ, 2004. – С. 218-289.

176. Новиков, Ф. В. Разработка аналитической модели устойчивого во времени процесса алмазного шлифования / Ф. В. Новиков, Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т» : Зб. наук. пр. Тем. вип. : Технології в машинобудуванні. – 2005. – № 12. – С. 51-63.

177. Gutsalenko, Yu. G. Efficient stability support of electroerosion diamond grinding / Yu. G. Gutsalenko // MicroCAD 2006 International Scientific Conference 16-17 March 2006. Section M : Production Engineering and Manufacturing Systems. – University of Miskolc. – PP. 65-68.

178. Беззубенко, Н. К. Эффективность алмазно-искрового шлифования вольфрамкобальтовых твердых сплавов / Н. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко // Высокие технологии: развитие и кадровое обеспечение. Материалы X

международ. науч.-техн. семинара «Интерпартнер» 14-20 сент. 2000 г., г. Алушта. – Харьков : Харьк. гос. политехн. ун-т, 2000. – С. 9-12.

179. Гуцаленко, Ю. Г. Особенности и перспективы алмазно-искрового шлифования в процессах высоких технологий / Ю. Г. Гуцаленко, Н. К. Беззубенко // Вестн. Харьк. гос. эконом. ун-та. – 1998. – № 1. – С. 81-86.

180. Гуцаленко, Ю. Г. О взаимосвязи характеристик стабильного режущего рельефа круга и устойчивого процесса шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Резание и инструмент в технологических системах : Международ. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. – Вып. 70. – С. 162-169.

181. Новиков, Ф. В. Формирование рабочей поверхности алмазного круга в процессе шлифования / Ф. В. Новиков, Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т»: Зб. наук. пр. Тем. вип. : Технології в машинобудуванні. – 2002. – № 9, т. 10. – С. 115-120.

182. Абразивная и алмазная обработка материалов : Справочник / Под ред. А. Н. Резникова. – М. : Машиностроение, 1977. – 390 с.

183. Якимов, А. В. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, Б. С. Серов, А. А. Якимов. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 450 с.

184. Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машгиз, 1962. – 384 с.

185. Обработка машиностроительных материалов алмазным инструментом / АН СССР, Отд-ние механики и процессов упр., Гос. науч.-исслед. ин-т машиноведения. – М. : Наука, 1966. – 251 с.

186. Дитиненко, С. А. Обоснование условий уменьшения шероховатости обработки при шлифовании / С. А. Дитиненко // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2001. – Вып. 5. – С. 77-80.

187. Дитиненко, С. А. Кинематические схемы формирования шероховатости поверхности при шлифовании / С. А. Дитиненко // Високі технології в машинобудуванні : Зб. наук. пр. НТУ «ХП». – Х. : НТУ «ХП», 2003. –

Вип. 1(8). – С. 34-42.

188. Дитиненко, С. А. Условия повышения чистоты обработки при шлифовании алмазными кругами на металлических связках / С. А. Дитиненко, Ю. Г. Гуцаленко, Ф. В. Новиков // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2003. – Вып. 64. – С. 69-74.

189. Ткаченко, В. П. Підвищення ефективності технології прецизійної обробки ущільнювальних кілець із композиційного матеріалу на основі реліту : Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 – технологія машинобудування / В. П. Ткаченко; Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – Х., 2004. – 21 с.

190. Ткаченко, В. П. Экспериментальные исследования алмазного шлифования торцовых поверхностей релитовых уплотнений / В. П. Ткаченко // Вісн. Харк. держ. техн. ун-ту сільс. госп-ва : Підвищення надійності відновлюємих деталей машин. – Х. : ХДТУСГ, 2003. – Вип. 18. – С. 44-50.

191. Ткаченко, В. П. Повышение эффективности алмазного торцового шлифования торца вращающегося кольца / В. П. Ткаченко // Високі технології в машинобудуванні : Зб. наук. пр. – Х. : НТУ «ХПИ», 2003. – Вип. 1. – С. 147-155.

192. Беззубенко, Н. К. Разработка и исследование новых высокоэффективных методов шлифования кругами из сверхтвердых материалов с введением в зону резания электрической энергии : Отчет о НИР / Н. К. Беззубенко (рук. темы), М. Д. Узунян (рук. темы), В. И. Дрожжин (рук. темы), Ю. Г. Гуцаленко, Н. П. Иванов, Л. Е. Кобзарь, П. Г. Матюха, В. В. Малыхин, П. К. Скоробогатько, В. Г. Солодовник, А. Г. Тимчук, В. А. Федорович, А. В. Ходыкин. – № гос. рег. 78047648; Инв. № Б973410. – Харьк. политехн. ин-т. – Харьков, 1980. – 198 с. – В надзаг. : Разработать процесс резания инструментами из новых сверхтвердых поликристаллических материалов, в том числе алмазно-абразивного шлифования, основанного на введении дополнительной энергии в зону обработки.

193. Беззубенко, Н. К. Исследование работоспособности инструмента и физических особенностей взаимодействия круга с деталью при алмазно-искровом шлифовании деталей оснастки синтеза алмазов, безвольфрамовых сплавов и конструкционных материалов / Н. К. Беззубенко (рук. темы), А. И. Грабченко, М. Я. Зубкова, Н. П. Иванов, А. Е. Кононов, А. И. Лесной, П. Г. Матюха, К. Н. Реут, М. Д. Узунян, А. В. Ходыкин, Н. Ф. Наконечный, Ю. Г. Гуцаленко, Чан Хыу Да, Дау Ле Син. – № гос. рег. 0184.0080779; Инв. № 0286.0067153. – Харьк. политехн. ин-т. – Харьков, 1981. – 173 с. – В надзаг. : ОНИЛ алмазных инструментов ХПИ.

194. Новиков, Ф. В. Повышение износостойкости алмазных кругов при глубинном шлифовании изделий из твердых сплавов и быстрорежущих сталей / Ф. В. Новиков, С. А. Сошников, Ю. Г. Гуцаленко // Применение прогрессивных инструментальных материалов и методов повышения стойкости режущих инструментов : Тез. докл. краев. науч.-техн. конф., март 1983 г. – Краснодар, 1983. – С. 73.

195. Новиков, Ф. В. Шероховатость обработанной поверхности при глубинном шлифовании / Ф. В. Новиков, Ю. Г. Гуцаленко // Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении : Межвуз. сб. науч. тр. – Пермь : Перм. политехн. ин-т, 1983. – С. 52-57.

196. Серова, Н. Н. Теплофизика процесса и качество обработки при алмазно-искровом шлифовании / Н. Н. Серова, Ю. Г. Гуцаленко // *Gepgyártástechnológia*, XXXIV évf. – 1994. – № 7-8. – PP. 315-320.

197. Набока, Е. В. Разработка и применение оснастки для повышения эффективности шлифования и заточки инструмента / Е. В. Набока, В. А. Фадеев, Ю. Г. Гуцаленко, Н. К. Беззубенко // Оснастка-95 : Тез. докл. конф. 26-27 апр. 1995 г. – Киев : О-во “Знание” Украины, 1995 – С. 43.

198. Беззубенко, Н. К. Прогрессивная технология алмазного шлифования / Н. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко // Оптимизация процесса обработки



конструкционных материалов : Сб. науч. тр. – Уфа : Уфим. гос. авиац. техн. ун-т, 1996. – С. 53-56.

199. Беззубенко, Н. К. Совершенствование процесса алмазно-искрового шлифования / Н. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко // Высокие технологии в машиностроении : тенденции развития, менеджмент, маркетинг : Тр. VII междунар. науч.-техн. семинара “Интерпартнер” 24-28 сент. 1997 г., г. Алушта. – Харьков : Харьк. гос. политехн. ун-т, 1997. – С. 26-30.

200. Гуцаленко, Ю. Г. Влияние скорости резания на расход алмазов при алмазно-искровом шлифовании труднообрабатываемых материалов / Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Харк. держ. політехн. ун-ту : Зб. наук. праць. – Вип. 101 : Машинобудування. – Харків : ХДПУ, 2000. – С. 97-100.

201. Беззубенко, М. К. Інтенсифіковане шліфування та спеціальні верстати / М. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко, О. В. Набока, Н. М. Серова. – Спец. наук.-техн. інформ. вип. : Міжрегіональна виставка “Енергозбереження-2001”, 10-13 жовтня 2000 р., м. Харків. – Х. : НТУ “ХПР”, 2000. – 6 с. – Рос. мовою.

202. Гуцаленко, Ю. Г. Обеспечение и особенности высокопроизводительной алмазной обработки с электроэрозионной правкой инструмента / Ю. Г. Гуцаленко, Г. В. Новиков // Наука и социальные проблемы общества: человек, техника, технология, окружающая среда : Материалы междунар. науч. – практ. конф., Харьков, 14-16 мая 2001 г. В восьми частях. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2001. – Ч. 6. – С. 48-50.

203. Беззубенко, М. К. Інтенсифіковане шліфування та спеціальні верстати / М. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко, О. В. Набока, Н. М. Серова. – Спец. наук.-техн. інформ. вип. : Міжрегіональна виставка “Машинобудування Харківщини - 2001”, 6-8 червня 2001 р., м. Харків. – Х. : НТУ “ХПР”, 2001. – 6 с. – Рос. мовою.

204. Беззубенко, М. К. Інтенсифіковане шліфування та спеціальні верстати / М. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко, О. В. Набока, Н. М. Серова. – Спец. наук.-

техн. інформ. вип. : Національна виставка “Україна. 10 років незалежності”, серпень 2001 р., м. Київ. – Х. : НТУ “ХПІ”, 2001. – 6 с. – Рос. мовою.

205. Гуцаленко, Ю. Г. Формирование режущего рельефа круга и обеспечение производительности обработки при алмазном электроэрозионном шлифовании / Ю. Г. Гуцаленко, Г. В. Новиков // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін.-т» : Зб. наук. пр. Тем. вип. : Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2001. – № 6. – С. 48-52.

206. Беззубенко, М. К. Інтенсифіковане шліфування та спеціальні верстати: енергозберігаючі рішення / М. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко, О. В. Набока, В. А. Фадєєв. – Проспект наук.-техн. розробки : Міжрегіональна виставка “Енергозбереження-2003”, 19-22 лютого 2003 р. – Х. : НТУ “ХПІ”, 2003. – 6 с. – Рос. мовою.

207. Гуцаленко, Ю. Г. Реновація і модернізація обладнання для високопродуктивних технологій алмазного шліфування / Ю. Г. Гуцаленко, О. Г. Гуцаленко, М. В. Буренков. – Проспект наук.-техн. розробки : Міжнар. спеціалізована виставка-ярмарок «РЕМАШЭКСПО 2003», 3-6 листопада 2003 р., м. Москва. – Х. : НТУ «ХПІ», 2003. – 5 с. – Рос. мовою.

208. Гуцаленко, Ю. Г. Рациональная эксплуатация алмазных кругов в процессах электроэрозионного шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Инструмент и технологии : Рос. науч.-техн. журн. – СПб. : Изд-во «Инструмент и технология», 2004. – № 21-22. – С. 143-146.

209. Гуцаленко, Ю. Г. Алмазное электроэрозионное шлифование высокопрочных сталей и сплавов / Ю. Г. Гуцаленко // Актуальные вопросы промышленности и прикладных наук (ЗНТК-2004) : Сб. ст. междунар. заоч. науч.-техн. конф. (1 окт. - 20 дек. 2004 г.) – Ульяновск : УлГТУ, 2004. – С. 32-36.

210. Gutsalenko, Yu. G. Electroerosion Diamond Grinding / Yu. G. Gutsalenko // MicroCAD 2005 International Scientific Conference 10-11 March 2005. Section M :

Production Engineering and Manufacturing Systems. University of Miskolc (Hungary). – PP. 165-168.

211. Гуцаленко, Ю. Г. Исследование трансформационных взаимосвязей функциональной устойчивости процесса шлифования и режущего рельефа инструмента / Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Нац. техн. ун-ту „Харк. політехн. ін-т” : Зб. наук. пр. Темат. вип. : Технології в машинобудуванні. –2005. – № 24. – С. 39-49.

212. Gutsalenko, Yu. G. Stabilization of Diamond Grinding / Yu. G. Gutsalenko // 7<sup>th</sup> International Conference “Research and Development in Mechanical Industry” RADMI 2007 16-20 September 2007, Belgrade, Serbia. Proceedings. – PP. 166-171.

213. Gutsalenko, Yu. Stable diamond grinding / Yu. Gutsalenko // Durability and Reliability of Mechanical Systems : 3<sup>rd</sup> Symposium with international participation : Targu-Jiu, May, 20-21, 2010 : Proceedings. – Targu Jiu : Editura “Academica Brancusi”, 2010. – PP. 222-227.

214. Гуцаленко, Ю. Г. Влияние скорости резания на расход алмазов при алмазно-искровом шлифовании / Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. СевНТУ : зб. наук. пр. – Вип. 140/2013. Сер. : Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь : СевНТУ, 2013. – С. 27-30.

215. Гуцаленко, Ю. Г. Характер и природа влияния скорости резания на износ кругов при алмазно-искровом шлифовании / Ю. Г. Гуцаленко // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2013. – Вип. 1(8). – С. 101-108.

216. Гуцаленко, Ю. Г. Влияние скорости резания на расход алмазов при круглом наружном алмазно-искровом шлифовании твердого сплава ВК 6 / Ю. Г. Гуцаленко // Инженерия поверхности и реновация изделий : Материалы 13-й междунар. наук.-техн. конф., 03-07 июня 2013 г., г. Ялта. – Киев : АТМ Украины, 2013. – С. 70-74.

217. Гуцаленко, Ю. Г. Кинетико-энергетический аспект возрастания износа металлической связки кругов с повышением скорости резания при алмазно-искровом шлифовании / Ю. Г. Гуцаленко // Інформаційні технології : наука,

техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXII міжнар. наук.-практ. конф. (15-17 жовт. 2014 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – Ч. I. – С. 102. – ISSN 2222-2944.

218. Гуцаленко, Ю. Г. Особенности влияния скорости резания и электрических импульсов на инструмент алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : Сб. науч. тр. XI-ой междунар. науч.-техн. конф. 19-21 мар. 2014 г. – В 4-х т. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – Т. 1. – С. 386-390. – ISBN 978-5-905556-88-3.

219. Гуцаленко, Ю. Г. Физические закономерности алмазного шлифования стали ШХ15 / Ю. Г. Гуцаленко, Г. В. Новиков // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : Харьк. гос. политехн. ун-т, 1999. – Вып. 55. – С. 73-74.

220. Погребной, Н. А. Исследование возможностей алмазно-искрового шлифования в управлении эксплуатационными свойствами и конструкционной прочностью материалов / Н. А. Погребной, Ю. Г. Гуцаленко, С. М. Шевченко // Високі технології в машинобудуванні : Зб. наук. пр. НТУ „ХПІ” – 2002. – Вип. 1 (5). – С. 297-300.

221. Беззубенко, Н. К. Расширение технологических возможностей алмазной обработки наплавленных покрытий / Н. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко // Производство и ремонт механизмов и машин в условиях конверсии : Тез. докл. конф. 23-25 мая 1995 г., Крым, Никит. ботан. сад. – Киев : О-во “Знание Украины”, 1995. – С. 94.

222. Гуцаленко, Ю. Г. Физические особенности шлифования износостойких наплавленных покрытий / Ю. Г. Гуцаленко // Високі технології в машинобудуванні : Зб. наук. пр. ХДПУ. – Х. : Харк. держ. політехн. ун-т, 1999. – С. 97-101.

223. Новиков, Г. В. Высокопроизводительное алмазное шлифование деталей с покрытиями / Г. В. Новиков, Ю. Г. Гуцаленко // Високі технології в

машинобудуванні : Зб. наук. пр. ХДПУ. – Х. : Харк. держ. політехн. ун-т, 1999. – С. 218-220.

224. Серова, Н. Н. Рентгенографические исследования влияния алмазного шлифования на технологическую наследственность стальных наплавов / Н. Н. Серова, Л. Е. Кобзарь, Ю. Г. Гуцаленко // Высокие технологии в машиностроении : современные тенденции развития : Материалы IX междунар. науч.-техн. семинара «Интерпартнер» 16-21 сент. 1999 г., г. Алушта. – Харьков : Харьк. гос. политехн. ун-т, 1999. – С. 66-67.

225. Гуцаленко, Ю. Г. Особенности алмазно-искрового шлифования наплавочного покрытия / Ю. Г. Гуцаленко // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та : Сб. науч. тр. – Вып. 59: Новые решения в соврем. технологиях. – Харьков : ХГПУ, 1999. – С. 81-83.

226. Гуцаленко, Ю. Г. Исследование себестоимости обработки при алмазно-искровом шлифовании / Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Харк. держ. політехн. ун-ту : Зб. наук. пр. – Вип. 63. – Х. : ХДПУ, 1999. – С. 119-124.

227. Гуцаленко, Ю. Г. Алмазное электроэрозионное шлифование теплостойких наплавов / Ю. Г. Гуцаленко // Проблемы теории и практики технологии машиностроения, механической и физико-технической обработки : Тр. междунар. науч.-техн. конф., 22-26 мая 2000 г. – Харьков : ХНПК «ФЭД», 2000. – С. 355-357.

228. Гуцаленко, Ю. Г. Алмазное электроэрозионное шлифование теплостойких наплавов / Ю. Г. Гуцаленко // Авиационно-космическая техника и технология : Тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 14. – Харьков : Гос. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2000. – С. 355-357.

229. Беззубенко, М. К. Алмазно-іскрове шліфування наплавов валків прокатних станів: досвід і перспективи / М. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко, В. А. Рибицький, О. Г. Гуцаленко. – Спец. наук.-техн. інформ. вип. : Міжнародна виставка «Алмаз - 2001», 4-6 липня 2001 р., м. Київ. – Х. : НТУ «ХПІ», 2001. – 5 с. – Рос. мовою.

230. Гуцаленко, Ю. Г. Энергоемкость алмазного шлифования наплавки кругами на металлической связке / Ю. Г. Гуцаленко, М. В. Буренков // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сборник. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2001. – Вып. 59. – С. 45-51.
231. Гуцаленко, О. Г. Електроерозійна обробка наплавки на вальцешліфувальних верстатах: спеціальне обладнання, інструмент, організація виробництва / О. Г. Гуцаленко, М. В. Буренков, Ю. Г. Гуцаленко, О. М. Шовковий. – Проспект наук.-техн. розробки : VII міжнар. виставка «Металлообработка-2002», 27-31 травня 2002 р., м. Москва. – Х. : НТУ «ХПИ», 2002. – 4 с. – Рос. мовою.
232. Новиков, Г. В. Высокопроизводительное алмазное шлифование деталей с покрытиями / Г. В. Новиков, Ю. Г. Гуцаленко // Мир техники и технологий : Междунар. техн. журн. – Харьков : Изд. дом „Проминь”. – 2003. – № 10. – С. 61.
233. Гуцаленко, Ю. Г. Рациональное электроэрозионное шлифование сталей и сплавов алмазными кругами на металлических связках / Ю. Г. Гуцаленко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : Зб. наук. пр. – Вип. № 17. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – С. 215-220.
234. Гуцаленко Ю.Г. Рациональная организация алмазно-искрового шлифования хромовольфрамowych наплавки / Ю. Г. Гуцаленко // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте : Материалы 13-го междунар. науч.-техн. семинара, 18-22 февр. 2013 г., г. Свалява. – Киев : АТМ Украины, 2013. – С. 35-38.
235. Gutsalenko, Yu. G. Influence of Bonding-Material on Wheel Wear at Diamond-Spark Grinding / Yu. G. Gutsalenko // The Publications of the XXVII. microCAD International Scientific Conference 21-22 March 2013 [Электрон. Ресурс : электрон. текст. и граф. данные (86477 Кб). – 1 электрон. оптич. диск (CD-ROM); цвет.; 12 см. – ISBN 978-963-358-018-9]. – Miskolc : University of Miskolc [Венгрия], 2013 [Создано : 17 мар. 2013 г.]. – 6 электрон. страниц (196 Кб) [Размещено : L14\_Yuriy\_G\_Gutsalenko.pdf]. – На англ. яз.

236. Гуцаленко, Ю. Г. Физические особенности и предупреждение интенсификации износа кругов с повышением скорости алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте : Материалы 14-го междунар. науч.-техн. семинара, 24-28 февр. 2014 г., г. Свалява. – Киев : АТМ Украины, 2014. – С. 48-50.
237. Сальтевский, И. С. Повышение эффективности шлифования керамики / И. С. Сальтевский, Л. Е. Кобзарь, Ю. Г. Гуцаленко // Проблемы резания материалов в современных технологических процессах : Тез. докл. междунар. науч.-техн. семинара “Интерпартнер” 4-8 окт. 1991 г., г. Алушта. – Харьков : Харьк. политехн. ин-т, 1991. – Ч. II. – С. 104-107.
238. Гуцаленко, Ю. Г. Прогнозирование эффективности шлифования на имитационных моделях / Ю. Г. Гуцаленко // Проблемы подготовки кадров для работы в условиях рыночной экономики : Тез. докл. укр. Науч.-практ. конф. 22-23 сент. 1992 г. – Харьков, 1992. – Ч. II. – С. 63-64.
239. Беззубенко, Н. К. Высокопроизводительное алмазно-искровое шлифование токопроводных керамических материалов / Н. К. Беззубенко, Н. Н. Серова, Ю. Г. Гуцаленко, Н. Н. Серова // Синтетические смолы и пластмассы. Технология производства и применение в отраслях промышленности : Тез. докл. конф. 28 февр. - 2 марта 1995 г., п. Сколе. – Киев : О-во “Знание” Украины, 1995. – С. 76.
240. Беззубенко, Н. К. Имитационное прогнозирование алмазного шлифования труднообрабатываемой конструкционной керамики / Н. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко // Автоматизация проектирования и производства изделий в машиностроении: Тез. докл. междунар. науч.-метод. конф. 4-6 окт. 1995 г., г. Сумы. – Киев : Ин-т систем. исслед. образования Украины, 1995. – С. 79-81.
241. Гуцаленко, Ю. Г. Повышение эффективности шлифования керамических покрытий и деталей двигателей внутреннего сгорания / Ю. Г. Гуцаленко // Процесс-Технология-Качество : Тр. Второго конгр. двигателестроителей

Украины 22-25 сент. 1997 г. Рыбачье. – Харьков : Ин-т машин и систем Минпромполитики и НАН Украины, 1997. – С. 306-309.

242. Новиков, Г. В. Роль кинематического и физического факторов в процессе шлифования / Г. В. Новиков, Ю. Г. Гуцаленко // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : Харьк. гос. политехн. ун-т, 2000. – Вып. 58. – С. 116-123.

243. Набока, Е. В. Комбинированные методы шлифования с использованием дополнительной энергии ультразвука и электрических разрядов / Е. В. Набока, Ю. Г. Гуцаленко // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Материалы IV междунар. науч.-техн. конф. «MicroCAD» 30-31 мая 1996 г. – Харьков : Харьк. гос. политехн. ун-т, 1996. – Ч. 2. – С. 168.

244. Фадеев, В. А. Особенности влияния электроразрядных процессов на поверхность обработки при алмазно-искровом шлифовании / В. А. Фадеев, Ю. Г. Гуцаленко, Л. Е. Кобзарь // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье : Тр. V междунар. науч.-техн. конф. “MicroCAD” 12-14 мая 1997 г. – Харьков : Харьк. гос. политехн. ун-т, 1997. – Ч. 2. – С. 406-409.

245. Беззубенко, Н. К. Качество поверхности деталей и инструмента при алмазно-искровом шлифовании / Н. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко, Н. Н. Серова // Технологическое управление качеством поверхности деталей : Сб. научн. тр. – Киев : Асоц. технологгов-машиностроителей Украины, 1998. – С. 108-114.

246. Гуцаленко, Ю. Г. Расчет электроэрозии при алмазно-искровом шлифовании по данным микроскопической визуализации / Ю. Г. Гуцаленко // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та : Сб. науч. тр. – Вып. 66 : Новые решения в соврем. технологиях. – Харьков : ХГПУ, 1999. – С. 54-58.

247. Новиков, Г. В. Производительность и энергоемкость алмазного шлифования / Г. В. Новиков, Ю. Г. Гуцаленко // Резание и инструмент в



технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : Харьк. гос. политехн. ун-т, 2000. – Вып. 56. – С. 124-128.

248. Серова, Н. Н. Физические особенности и возможности алмазно-искрового шлифования как отражение свойств материалов режущего контакта / Н. Н. Серова, Ю. Г. Гуцаленко // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье : Сб. науч. тр. ХГПУ. – Вып. 6. – Харьков : Харьк. гос. политехн. ун-т, 1998. – Ч. 4. – С. 209-211.

249. Гуцаленко, Ю. Г. Эффективность алмазного электроэрозионного шлифования высокопрочных сталей / Ю. Г. Гуцаленко, Г. В. Новиков // Механіка та машинобудування. – 2000. – № 1. – С. 188-192.

250. Гуцаленко, Ю. Г. Математическое моделирование и анализ технологических возможностей операций высокопроизводительного алмазного шлифования изделий из высокопрочных пластичных материалов / Ю. Г. Гуцаленко, Ф. В. Новиков // Физические и компьютерные технологии : Тр. 11-й Междунар. науч.-техн. конф., 2-3 июня 2005 г. – Харьков : ХНПК «ФЭД», 2005. – С. 126-135.

251. Гуцаленко, Ю. Г. Аналитические посылки и технологические возможности операций устойчивого шлифования алмазными кругами на металлических связках / Ю. Г. Гуцаленко // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2005. – Вып. 69. – С. 43-55.

252. Гуцаленко, Ю. Г. Аналитическая модель и рабочие возможности операций алмазного шлифования с оптимальной поддержкой развитости режущего рельефа / Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. СевНТУ : зб. наук. пр. – Вип. 139/2013. Сер. : Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь : СевНТУ, 2013. – С. 62-68.

253. Погребной, Н. А. Импульсное упрочнение стали в процессе алмазно-искрового шлифования / Н. А. Погребной, С. М. Шевченко, Ю. Г. Гуцаленко, С. А. Дитиненко // Резание и инструмент в технологических системах :

Международ. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2005. – Вып. 68. – С. 323-327.

254. Погрібний, М. А. Імпульсне зміцнення сталі в процесі алмазно-іскрового шліфування / М. А. Погрібний, С. М. Шевченко, Ю. Г. Гуцаленко, С. О. Дитиненко // Высокие технологии : тенденции развития : Материалы XIV международ. науч.-техн. семинара, 12-17 сент. 2005 г. – Харьков-Алушта : НТУ «ХПИ», 2005. – С. 96-97.

255. Волков, О. А. Алмазно-искровое шлифование с выхаживанием стальных поверхностей после термофрикционной обработки / О. А. Волков, Ю. Г. Гуцаленко, Н. А. Погребной // Прогресивні напрямки розвитку машино-приладобудівних галузей і транспорту : Матеріали міжнар. наук.-техн. конф. студ., асп. та молодих вчених, м. Севастополь, 12-16 травня 2008 р. – Севастополь : Вид-во СевНТУ, 2008. – Т. 1. – С. 38-39.

256. Gutsalenco, Yu. Diamond-spark grinding in forming of functional white layers of increased microhardness in steels / Yu. Gutsalenco // Durabilitates si fiabilitatea sistemelor mecanice: simpozion stiintific international : Targu-Jiu, ed. I, 2008, 20-21 iunie. – Targu-Jiu : Academica Brancusi, 2008. – PP. 153-156.

257. Gutsalenco, Yu. Diamond-spark grinding in forming of functional white layers of increased microhardness in steels / Yu. Gutsalenco // Fiabilitate si Durabilitate – Fiability & Durability. – Nr. 2/2008. – Targu Jiu: Editura “Academica Brancusi”, 2008. – PP. 1-3.

258. Кобзарь, Л. Е. Повышение стойкости кругов рациональным выбором электрических режимов при внутреннем алмазно-искровом шлифовании / Л. Е. Кобзарь, Ю. Г. Гуцаленко // Применение прогрессивных инструментальных материалов и методов повышения стойкости режущих инструментов : Тез. докл. Второй краев. науч.-техн. конф., март 1985 г. – Краснодар, 1985. – С. 80.

259. Гуцаленко, Ю. Г. Контроль и оценка состояния зоны шлифования по ее электрическому сопротивлению / Ю. Г. Гуцаленко, Л. Е. Кобзарь //

Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Материалы IV междунар. науч.-техн. конф. «MicroCAD» 30-31 мая 1996 г. – Харьков : Харьк. гос. политехн. ун-т, 1996. – Ч. 1. – С. 135.

260. Гуцаленко, Ю. Г. Методика контроля процесса шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Новые технологии в машиностроении : Материалы Пятой междунар. конф. 18-21 сент. 1996 г., Рыбачье. – Харьков, 1996. – С. 114.

261. Гуцаленко, Ю. Г. Электрическая характеристика зоны шлифования / Ю. Г. Гуцаленко, Л. Е. Кобзарь // Двигатель XXI века: Материалы конгр. двигателестроителей Украины 23-26 сент. 1996 г., Рыбачье. – Харьков : Ин-т машин и систем Минмашпрома и НАН Украины, 1996. – С. 61-62.

262. Гуцаленко, Ю. Г. Возможности оценки условий и качества обработки по электрическому сопротивлению зоны шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Высокие технологии в машиностроении: диагностика процессов и обеспечение качества: Материалы VI междунар. науч.-техн. семинара «Интерпартнер» 30 сент. – 4 окт. 1996 г., г. Алушта. – Харьков : Харьк. гос. политехн. ун-т, 1996. – С. 34-35.

263. Кобзарь, Л. Е. Расширение технологических возможностей алмазно-искрового шлифования / Л. Е. Кобзарь, Ю. Г. Гуцаленко // Информационные технологии : наука, техника, технология, образование, здоровье : Тр. V междунар. науч.-техн. конф. “MicroCAD” 12-14 мая 1997 г. – Харьков : Харьк. гос. политехн. ун-т, 1997. – Ч. 2. – С. 288-291.

264. Гуцаленко, Ю. Г. К выбору режимов и условий алмазного шлифования с электроэрозионной правкой инструмента / Ю. Г. Гуцаленко // Процесс-Технология-Качество : Тр. Второго конгр. двигателестроителей Украины 22-25 сент. 1997 г. Рыбачье. – Харьков : Ин-т машин и систем Минпромполитики и НАН Украины, 1997. – С. 301-305.

265. Bezzubenko, N. Diamond grinding with additional electrophysical processes in cutting zone: some practical aspects of efficiency increase / N. Bezzubenko, Yu. Gutsalenko, L. Kobzar // Высокие технологии в машиностроении :

современные тенденции развития : Материалы IX междунар. науч.-техн. семинара «Интерпартнер» 16-21 сент. 1999 г., г. Алушта. – Харьков : Харьк. гос. политехн. ун-т, 1999. – С. 23-24.

266. Гуцаленко, Ю. Г. Снижение энергоёмкости алмазного шлифования / Ю. Г. Гуцаленко, М. К. Беззубенко // Наука и социальные проблемы общества: человек, техника, технология, окружающая среда : Материалы междунар. науч. – практ. конф., Харьков, 14-16 мая 2001 г. В восьми частях. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2001. – Ч. 1. – С. 57.

267. Беззубенко, Н. К. Физические предпосылки и технологические возможности двойного скоростного шлифования с тонкими сечениями среза / Н. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко // Наука и социальные проблемы общества : человек, техника, технология, окружающая среда : Материалы междунар. науч. – практ. конф., Харьков, 14-16 мая 2001 г. В восьми частях. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2001. – Ч. 8. – С. 6-8.

268. Беззубенко, Н. К. Новые кинематические схемы шлифовальных станков / Н. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко, Ф. В. Новиков, В. А. Фадеев // Наука и социальные проблемы общества : человек, техника, технология, окружающая среда : Материалы междунар. науч. – практ. конф., Харьков, 14-16 мая 2001 г. В восьми частях. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2001. – Ч. 8. – С. 9-11.

269. Гуцаленко, Ю. Г. Обрабатываемость материалов различными способами шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Нац. техн. ун-ту "Харк. політехн. ін-т" : Зб. наук. пр. Тем. вип. 11 : Технічний прогрес та ефективність виробництва. – Х. : НТУ "ХПІ", 2001. – С. 127-131.

270. Кобзарь, Л. Е. Эффективность выхаживания при внутреннем алмазно-искровом шлифовании магнитотвердого материала ЮНДК35Т5БА / Л. Е. Кобзарь, Ю. Г. Гуцаленко // Повышение эффективности инструментального производства : Тез. докл. XI науч.-техн. конф. инструментальщиков Урала 19-20 мая 1982 г. – Пермь, 1982. – С. 82-83.

271. Беззубенко, Н. К. Разработка и исследование технологического процесса с использованием электрофизических методов правки алмазных кругов на металлической связке, предназначенных для финишной обработки труднообрабатываемых материалов / Н. К. Беззубенко (рук. темы), Л. Е. Кобзарь, А. И. Коваль, П. И. Лукаренко, И. С. Сальтевский, Б. М. Свердлова, Чан Хыу Да, Дау Ле Син, Н. П. Иванов, М. Д. Узунян, В. Г. Звагольский, Ю. Г. Гуцаленко. – № гос. рег. 81095841; Инв. № 0284.0062118 [Хоздоговор 22706; п/я Г-4895] – Харьк. политехн. ин-т. – Харьков, 1983. – 65 с. – В надзаг. : Провести научно-исследовательские работы по разработке технологических процессов финишной обработки труднообрабатываемых материалов, в т. ч. магнитных, титановых, безвольфрамовых и др. сплавов с использованием электрофизических методов, определить номенклатуру технологических комплексов и их структуру.
272. Кобзарь, Л. Е. Рациональная эксплуатация кругов и электрические режимы при внутреннем алмазно-искровом шлифовании магнитотвердого материала ЮНДК35Т5БА / Л. Е. Кобзарь, Ю. Г. Гуцаленко // Механизация ручных работ и трудоемких технологических процессов в инструментальном производстве : Тез. докл. XII науч.-техн. конф. инструментальщиков Урала 22-23 мая 1985 г. – Пермь, 1985. – С. 60-61.
273. Гуцаленко, Ю. Г. Физические условия эффективности алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко, Г. В. Новиков, Л. Е. Кобзарь // Механіка та машинобудування. – 1999. – № 1. – С. 214-218.
274. Погребной, Н. А. Качество поверхности и повышение эффективности алмазно-искрового шлифования / Н. А. Погребной, Ю. Г. Гуцаленко, В. А. Исаев, С. М. Шевченко // Высокие технологии в машиностроении : Сб. науч. тр. ХГПУ. – Харьков : Харьк. гос. политехн. ун-т, 1998. – С. 237-239.
275. Маслов, Е. Н. Основные закономерности высокопроизводительного шлифования / Е. Н. Маслов // В кн. : Высокопроизводительное шлифование. – М. : Изд-во Акад. наук СССР, 1962. – С. 3-17.

276. Кобзарь, Л. Е. Алмазно-эрозионное внутреннее шлифование с высокой скоростью детали / Л. Е. Кобзарь // Резание и инструмент : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 1979. – Вып. 21. – С. 126-128.
277. Дитиненко, С. А. Повышение эффективности технологии финишной обработки цилиндрических поверхностей твердосплавных изделий : Дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 – технология машиностроения / С. А. Дитиненко; Харьк. нац. эконом. ун-т [вып.]; Нац. техн. ун-т „Харк. политехн. ин-т” [защита]. – Харьков, 2005. – 184 с.
278. Новиков, Ф. В. Некоторые принципы условной оптимизации алмазного шлифования / Ф. В. Новиков, Ю. Г. Гуцаленко // Производство и применение сверхтвердых материалов : Сб. науч. тр. – Киев : Ин-т сверхтвердых материалов АН УССР, 1983. – С. 154-156.
279. Гуцаленко, Ю. Г. Условия, особенности, структура, опыт и перспективы экономической эффективности алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Высокие технологии: развитие и кадровое обеспечение : Материалы XI междунар. науч.-техн. семинара , 12-17 сент. 2001 г., г. Алушта – Харьков : НТУ «ХПИ», 2001. – С. 65-69.
280. Новиков, Ф. В. Экономико-технологический анализ механической обработки деталей машин / Ф. В. Новиков, В. П. Ткаченко, Г. В. Новиков, Ю. Г. Гуцаленко // Исследование и оптимизация экономических процессов : Тр. III междунар. науч.-практ. конф. „Оптимум-2001”, 15-16 ноября 2001 г. – Харьков : НТУ „ХПИ”, 2001. – С. 197-198.
281. Гуцаленко, Ю. Г. Влияние связки круга на затраты по инструментальному обеспечению алмазного шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Харк. держ. політехн. ун-ту: Зб. наук. праць. – Вип. 99 : Системний аналіз, управління і інформаційні технології. – Х. : ХДПУ, 2000. – С. 57-59.
282. Каталог ОАО «Полтавский алмазный завод». – Полтава, 2000. – 60 с.

283. Палатник Л.С. Рентгенографическое исследование превращений в поверхностном слое металлов, подвергшихся действию электрических разрядов // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1951. – Т. 15. – С. 80-84.
284. Гуцаленко, Ю. Г. Износ алмазно-абразивного инструмента в процессе шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Наукові праці ДонНТУ. Серія : Машинобудування і машинознавство. – Вип. 1(10)'2013. – С. 16-20.
285. Гуцаленко, Ю. Г. Организация технических систем и технологические перспективы алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Високі технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Вип. 1(23) – X. : НТУ «ХП», 2013. – С.30-39.
286. Братан, С. М. Покрyтия для электроизоляционной защиты планшайбы шлифовального станка / С. М. Братан, К. Янку, Ю. Г. Гуцаленко, Е. К. Севидова // Вісн. СевНТУ : зб. наук. пр. – Вип. 151/2014. Сер. : Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь : СевНТУ, 2014.– С. 28-31.
287. Гуцаленко, Ю. Г. Расчетные оценки и использование электрической эрозии в формировании рельефа обработанной поверхности при алмазно-искровом шлифовании / Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. СевНТУ : зб. наук. пр. – Вип. 150/2014. Сер. : Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь : СевНТУ, 2014.– С. 61-64.
288. Погребной, Н. А. Поведение, структура и свойства медно-оловянной связки марки М2-01 в инструментах процессов алмазно-искрового шлифования / Н. А. Погребной, Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. СевНТУ : зб. наук. пр. – Вип. 151/2014. Сер. : Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь : СевНТУ, 2014.– С. 140-144.
289. Гуцаленко, Ю. Г. Сравнительный анализ ресурсного потенциала алмазных кругов с режущими зёрнами различного заострения и притупления в процессах тонкого чистового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Резание и инструмент в

технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2014. – Вып. 84. – С. 56-61.

290. Гуцаленко, Ю. Г. Теория и практика оптимальной организации электроразрядных технологий спекания под давлением и алмазного шлифования высокоплотных порошковых материалов / Ю. Г. Гуцаленко // Сучасні технології в машинобудуванні. – Вып. 9. – Х. : НТУ «ХПИ», 2014. – С. 17-22.

291. Гуцаленко, Ю. Г. Взаимосвязь параметров режущего рельефа с шероховатостью и производительностью алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Різання та інструмент в технологічних системах [ISSN 2078-7405]. – 2015. – Вып. 85.– С. 56-64.

292. Гуцаленко, Ю. Г. Станкоинструментальные электроизоляционные покрытия поддержки алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко, В. В. Ивкин, А. В. Руднев, Е. К. Севидова, И. И. Степанова // Високі технології в машинобудуванні [ISSN 2078-7677]. – 2015. – Вып. 1 (25). – С. 59-63.

293. Гуцаленко, Ю. Г. Физический прогноз особенностей вскрытия зеренных металлопокрытий с ультрадисперсными алмазами при алмазно-искровом шлифовании / Ю. Г. Гуцаленко // Сучасні технології в машинобудуванні [ISSN 2078-7499]. – 2015. – Вып. 10. – С. 27-36.

294. Гуцаленко, Ю. Г. Электрофизический аспект формообразования под давлением высокофункциональных наноструктурных материалов спарк-плазменным спеканием и алмазно-искровым шлифованием / Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. [СевНТУ] : зб. наук. пр. [ISSN: 2307-6488] – Вып. 1/2016. [Сер. : Машиноприладобудування та транспорт]. – Севастополь : [СевНТУ], 2016.– С. 40-49. – У вихідних даних надрукованого видання (мовою оригіналу) : Вестник современных технологий: сб. науч. тр. Севастоп. гос. ун-т[a] (СевГУ).

295. Gutsalenko, Yu. Fracture features of metal binding when diamond-spark grinding / Yu. Gutsalenko // Fiability & Durability [Targu-Jiu : “Constantin



Brancusi” University of Targu-Jiu]. – 2012 [May]. – No.1[(9)]. – PP. 159-163. – ISSN 1844-640X.

296. Novoselov, Yu. Calculation of surface roughness parameters for external cylindrical grinding / Yu. Novoselov, S. Bratan, V. Bogutsky, Yu. Gutsalenko // *Fiability & Durability* [Targu-Jiu : “Constantin Brancusi” University of Targu-Jiu]. – 2013. – No. 1[(11)]. – PP. 5-15. – ISSN 1844-640X.

297. Bratan, S. Synthesis of model the Luenberger observer for external cylindrical grinding process / S. Bratan, D Sidorov, Yu. Gutsalenko // *Fiability & Durability* [Targu-Jiu : “Constantin Brancusi” University of Targu-Jiu]. – 2013. – No. 1[(11)]. – PP. 23-32. – ISSN 1844-640X.

298. Беззубенко, М. К. Алмазно-іскрове шліфування: назустріч 40-річчю / М. К. Беззубенко, Ю. Г. Гуцаленко // *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XX міжнар. наук.-практ. конф. (15-17 трав. 2012 р., Харків).* – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2012. – Ч. I. – С. 92. – ISSN 2222-2944.

299. Гуцаленко, Ю. Г. Критеріальні ознаки податливості та стійкості чистих металів вибуховому випарюванню при алмазно-іскровому шліфуванні / Ю. Г. Гуцаленко // *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XX міжнар. наук.-практ. конф. (15-17 трав. 2012 р., Харків).* – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2012. – Ч. I. – С. 103. – ISSN 2222-2944.

300. Гуцаленко, Ю. Г. Об'єднання рядів стійкості металів тепловому електророзрядному і механічному швидкісному ударам з погляду на алмазно-іскрове шліфування / Ю. Г. Гуцаленко // *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XX міжнар. наук.-практ. конф. (15-17 трав. 2012 р., Харків).* – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2012. – Ч. I. – С. 105. – ISSN 2222-2944.

301. Гуцаленко, Ю. Г. Поддержка алмазно-искровым шлифованием упрочнения сталей термофрикционной обработкой / Ю. Г. Гуцаленко, Н. А. Погребной, О.А. Волков // *Инженерия поверхности и реновация изделий : Материалы 12-й*

международ. науч.-техн. конф., 04-08 июня 2012 г., г. Ялта. – Киев : АТМ Украины, 2012. – С. 83-85.

302. Гуцаленко, Ю. Г. Критериальные признаки и ряд податливости металлов взрывному испарению при высокоскоростном механическом ударе и электроразрядном контакте [Электрон. ресурс] / Ю. Г. Гуцаленко // Современные информационные технологии, средства автоматизации и электропривод: Материалы всеукр. науч.-техн. [заоч.] конф. 10-14[21] дек. 2012 г., Краматорск, Украина. – Краматорск : Донбас. гос. машиностр. акад., 2012 (12.12.2012 10:29:17). – Электрон. текст. дан. (102592 б). – Режим доступа : <http://www.itp.dn.ua/razdel-2/2012-12-10-07-44-46.html> . – На 2-х электрон. с. – Сайт размещения разработан каф. «Компьютер. информац. технологии» Донбас. гос. машиностр. акад.: <http://www.dgma.donetsk.ua/kafedra-kompyuternih-informatsiynih-tehnologiy.html> .

303. Гуцаленко, Ю. Г. Современные подходы к универсализации станкоинструментальных решений для осуществления алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко, Е. К. Севидова, А. В. Руднев // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте : Материалы 13-го международ. науч.-техн. семинара, 18-22 февр. 2013 г., г. Свалява. – Киев : АТМ Украины, 2013. – С. 38-40.

304. Гуцаленко, Ю. Г. Задачи оптимизации функционирования электромеханической системы алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXI міжнар. наук.-практ. конф. (29-31 трав. 2013 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – Ч. I. – С. 82. – ISSN 2222-2944.

305. Гуцаленко, Ю. Г. Общие и специальные вопросы электромагнитной безопасности алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXI міжнар. наук.-практ. конф. (29-31 трав. 2013 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – Ч. I. – С. 85. – ISSN 2222-2944.

306. Гуцаленко, Ю. Г. Специфические вопросы экобезопасности алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXI міжнар. наук.-практ. конф. (29-31 трав. 2013 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – Ч. I. – С. 87. – ISSN 2222-2944.
307. Гуцаленко, Ю. Г. Челябинский метеорит и гипотеза взрывного разрушения металлов при высокоскоростном алмазно-искровом шлифовании / Ю. Г. Гуцаленко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXI міжнар. наук.-практ. конф. (29-31 трав. 2013 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – Ч. I. – С. 88. – ISSN 2222-2944.
308. Гуцаленко, Ю. Г. Адаптация продукции станкоинструментальной промышленности к эксплуатационным модернизационным решениям для алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко, Е. К. Севидова, В. В. Ивкин // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXI міжнар. наук.-практ. конф. (29-31 трав. 2013 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – Ч. I. – С. 89. – ISSN 2222-2944.
309. Гуцаленко, Ю. Г. Основні мотиви і завдання проекту M2240 НТУ «ХП» (2013-2014 рр.) / Ю. Г. Гуцаленко, О. К. Севідова, О. В. Руднєв, В. В. Івкін // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXI міжнар. наук.-практ. конф. (29-31 трав. 2013 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – Ч. I. – С. 90. – ISSN 2222-2944.
310. Гуцаленко, Ю. Г. Сучасні перспективи алмазно-іскрового шліфування і модернізаційні підходи до універсалізації технологічних систем для його реалізації / Ю. Г. Гуцаленко, Г. К. Крыжний, А. А. Аракелян // Міжнар. наук.-техн. конф. "Машинобудування – очима молодих". Кременчук, 30 жовт. – 1 листоп. 2013 р. : матеріали конф. – Кременчук : КрНУ ім. Михайла Остроградського, 2013. – С. 144-146.
311. Гуцаленко, Ю. Г. Алмазно-искровое шлифование и организационно-технические мероприятия в промышленности / Ю. Г. Гуцаленко, Е. К. Севидова

// Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте : Материалы 14-го междунар. науч.-техн. семинара, 24-28 февр. 2014 г., г. Свалява. – Киев : АТМ Украины, 2014. – С. 50-52.

312. Гуцаленко, Ю. Г. Проблемы электроразрядных технологий спекания под давлением и алмазного шлифования порошковых материалов с высокоплотной структурой / Ю. Г. Гуцаленко // Физические и компьютерные технологии : Тр. 19-й междунар. науч.-практ. конф., 25-26 июня 2014 г. – Харьков : ГП ХМЗ «ФЭД», 2014. – С. 29-32.

313. Гуцаленко, Ю. Г. Некоторые геометрические аспекты влияния качества алмазных шлифпорошков на ресурс инструмента / Ю. Г. Гуцаленко // Качество, стандартизация, контроль : теория и практика : Материалы 14-й междунар. науч.-практ. конф, 23-26 сент. 2014 г., г. Одесса. – Киев : АТМ Украины, 2014. – С. 29-31.

314. Гуцаленко, Ю. Г. Концепция использования электроизоляционных покрытий в станкоинструментальном обеспечении алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXII міжнар. наук.-практ. конф. (15-17 жовт. 2014 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – Ч. I. – С. 103. – ISSN 2222-2944.

315. Гуцаленко, Ю. Г. Модель эрозионного сглаживания шероховатости поверхности при алмазно-искровом шлифовании / Ю. Г. Гуцаленко // Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXII міжнар. наук.-практ. конф. (15-17 жовт. 2014 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – Ч. I. – С. 104. – ISSN 2222-2944.

316. Гуцаленко, Ю. Г. Некоторые доводы в пользу адаптации продукции для организации алмазно-искрового шлифования в станкоинструментальной промышленности / Ю. Г. Гуцаленко // Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXII міжнар. наук.-практ. конф. (15-17

жовт. 2014 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – Ч. I. – С. 105. – ISSN 2222-2944.

317. Гуцаленко, Ю. Г. Физика оптимизации электроразрядных технологий спекания под давлением и шлифования тугоплавких порошковых материалов с высокоплотной структурой / Ю. Г. Гуцаленко // Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXII міжнар. наук.-практ. конф. (15-17 жовт. 2014 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – Ч. I. – С. 106. – ISSN 2222-2944.

318. Погребной, Н. А. Влияние электрофизики алмазно-искрового шлифования на металлосвязку инструмента / Н. А. Погребной, Ю. Г. Гуцаленко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доп. XXII міжнар. наук.-практ. конф. (15-17 жовт. 2014 р., Харків). – У 4-х ч. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – Ч. I. – С. 150. – ISSN 2222-2944.

319. Севидова, Е. К. Опыт разработки анодно-искровых покрытий применительно к задаче износостойкой электроизоляции поверхностей алюминиевых сплавов (обзор) / Е. К. Севидова, Ю. Г. Гуцаленко, Н. В. Крюкова // Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXII міжнар. наук.-практ. конф. (15-17 жовт. 2014 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – Ч. I. – С. 157. – ISSN 2222-2944.

320. Севидова, Е. К. Противозащитная защита корпуса станка при алмазно-искровом шлифовании применением изоляционных покрытий / Е. К. Севидова, Ю. Г. Гуцаленко, А. В. Руднев, В. В. Ивкин // Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXII міжнар. наук.-практ. конф. (15-17 жовт. 2014 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – Ч. I. – С. 158. – ISSN 2222-2944.

321. Севидова, Е. К. Электроизоляционная защита посадочных поверхностей корпуса инструмента при алмазно-искровом шлифовании / Е. К. Севидова, Ю. Г. Гуцаленко, И. И. Степанова // Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : Тези доп. XXII міжнар. наук.-практ. конф. (15-17

жовт. 2014 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – Ч. I. – С. 159. – ISSN 2222-2944.

322. Федюкин, Ю. В. Разработка рекомендаций по специальным износостойким покрытиям элементов технической системы интенсифицированных технологий шлифования / Ю. В. Федюкин, Г. К. Крыжний, Ю. Г. Гуцаленко // Прогрессивные направления развития машиноприборостроительных отраслей и транспорта : Сб. статей по материалам регион. студенч. науч.-техн. конф. Севастополь, 18-21 мая 2015 г. – Севастополь, 2015. – С. 153-154.

323. Гуцаленко, Ю. Г. Организация экспертной системы шероховатости поверхности торцевого алмазно-искрового шлифования для поддержки решения конструкторско-технологических задач / Ю. Г. Гуцаленко, А. В. Руднев // Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я [ISSN 2222-2944] : Тези доп. XXIII міжнар. наук.-практ. конф. (20-22 трав. 2015 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – Ч. I. – С. 94.

324. Гуцаленко, Ю. Г. Поведение электрического тока в металлизации алмазных зерен с использованием детонационных наноалмазов при алмазно-искровом шлифовании / Ю. Г. Гуцаленко // Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я [ISSN 2222-2944] : Тези доп. XXIII міжнар. наук.-практ. конф. (20-22 трав. 2015 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – Ч. I. – С. 87.

325. Гуцаленко, Ю. Г. Предпосылки и следствие улучшения металлизации алмазных зерен электроразрядной очисткой детонационных наноалмазов в ее составе при алмазно-искровом шлифовании / Ю. Г. Гуцаленко // Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я [ISSN 2222-2944] : Тези доп. XXIII міжнар. наук.-практ. конф. (20-22 трав. 2015 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – Ч. I. – С. 89.

326. Гуцаленко, Ю. Г. Применимость в современном станкостроении конструкторской документации на модернизацию универсальных шлифовальных станков для реализации алмазно-искрового шлифования /

Ю. Г. Гуцаленко // Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я [ISSN 2222-2944] : Тези доп. XXIII міжнар. наук.-практ. конф. (20-22 трав. 2015 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – Ч. I. – С. 90.

327. Гуцаленко, Ю. Г. Разработка конструкторской документации на приспособления для алмазно-искрового шлифования на универсальных станках / Ю. Г. Гуцаленко, В. В. Ивкин, А. В. Руднев // Інформаційні технології : наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я [ISSN 2222-2944] : Тези доп. XXIII міжнар. наук.-практ. конф. (20-22 трав. 2015 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2015. – Ч. I. – С. 93.

328. Гуцаленко, Ю. Г. Особенности вскрытия металлопокрытий с ультрадисперсными алмазами на режущих зернах инструментов алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Инженерия поверхности и реновация изделий : Материалы 15-й междунар. науч.-техн. конф., 01-05 июня 2015 г., Одесская обл., Затока. – Киев : АТМ Украины, 2015. – С. 51-53.

329. Гуцаленко, Ю. Г. Взаимосвязь параметров режущего рельефа алмазного круга с шероховатостью и производительностью обработки при устойчивом шлифовании / Ю. Г. Гуцаленко // Високі технології : тенденції розвитку. Матеріали XXIII міжнародного науково-технічного семінару, 7-12 вересня 2015 р., м. Одеса [Електронний ресурс, [http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2015/08/IP-2015\\_Matters.pdf](http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2015/08/IP-2015_Matters.pdf), ISBN 978-966-8944-78-9]. – Х. : Вид-во «Курсор», НТУ «ХП», 2015. – С. 58 [23,0 Кб].

330. Гуцаленко, Ю. Г. Взаимосвязь параметров режущего рельефа с шероховатостью и производительностью алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Високі технології : тенденції розвитку. Матеріали XXIII міжнародного науково-технічного семінару, 7-12 вересня 2015 р., м. Одеса [Електронний ресурс, [http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2015/08/IP-2015\\_Matters.pdf](http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2015/08/IP-2015_Matters.pdf), ISBN 978-966-8944-78-9]. – Х. : Вид-во «Курсор», НТУ «ХП», 2015. – С. 59-60 [23,0 Кб].

331. Гуцаленко, Ю. Г. Модернизация эксплуатируемых универсальных шлифовальных станков и возможности современного развития модельного ряда станкостроения для реализации алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко, В. В. Ивкин, А. В. Руднев // Високі технології : тенденції розвитку. Матеріали XXIII міжнародного науково-технічного семінару, 7-12 вересня 2015 р., м. Одеса [Електронний ресурс, [http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2015/08/IP-2015\\_Matters.pdf](http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2015/08/IP-2015_Matters.pdf), ISBN 978-966-8944-78-9]. – Х. : Вид-во «Курсор», НТУ «ХП», 2015. – С. 71-75 [39,5 Кб].
332. Гуцаленко, Ю. Г. Особенности и возможности формирования микрогеометрии обработанной поверхности алмазно-искровым шлифованием / Ю. Г. Гуцаленко // Високі технології : тенденції розвитку. Матеріали XXIII міжнародного науково-технічного семінару, 7-12 вересня 2015 р., м. Одеса [Електронний ресурс, [http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2015/08/IP-2015\\_Matters.pdf](http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2015/08/IP-2015_Matters.pdf), ISBN 978-966-8944-78-9]. – Х. : Вид-во «Курсор», НТУ «ХП», 2015. – С. 60-65 [252 Кб].
333. Гуцаленко, Ю. Г. Станкоинструментальные электроизоляционные покрытия поддержки алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Високі технології : тенденції розвитку. Матеріали XXIII міжнародного науково-технічного семінару, 7-12 вересня 2015 р., м. Одеса [Електронний ресурс, [http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2015/08/IP-2015\\_Matters.pdf](http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2015/08/IP-2015_Matters.pdf), ISBN 978-966-8944-78-9]. – Х. : Вид-во «Курсор», НТУ «ХП», 2015. – С. 75-76 [28,0 Кб].
334. Гуцаленко, Ю. Г. Физический прогноз особенностей вскрытия зеренных металлопокрытий с ультрадисперсными алмазами при алмазно-искровом шлифовании / Ю. Г. Гуцаленко // Високі технології : тенденції розвитку. Матеріали XXIII міжнародного науково-технічного семінару, 7-12 вересня 2015 р., м. Одеса [Електронний ресурс, <http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp->



[content/uploads/sites/143/2015/08/IP-2015\\_Matters.pdf](https://www.researchgate.net/publication/309111111/content/uploads/sites/143/2015/08/IP-2015_Matters.pdf), ISBN 978-966-8944-78-9].

– Х. : Вид-во «Курсор», НТУ «ХП», 2015. – С. 69-71 [28,5 Кб].

335. Гуцаленко, Ю. Г. Физико-технологические предпосылки разработки процессно-ориентированной интегрированной системы управления микрогеометрическим качеством алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Качество, стандартизация, контроль : теория и практика : Материалы 15-й междунар. науч.-практ. конф, 15-18 сент. 2015 г., г. Одесса. – Киев : АТМ Украины, 2015. – С. 29-31.

336. Гуцаленко, Ю. Г. Современные подходы к организации и реализации технических систем и технологий алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко, К. Янку // Физические и компьютерные технологии : Тр. 21-й междунар. науч.-практ. конф. 24-25 дек. 2015 г., г. Харьков. – Днепропетровск : Изд-во «Лира», 2015. – С. 29-38.

337. Гуцаленко, Ю. Г. / Специфические особенности и возможности алмазно-искрового шлифования в микрогеометрической инженерии поверхности / Ю. Г. Гуцаленко, А. А. Аракелян // Физические и компьютерные технологии : Тр. 21-й междунар. науч.-практ. конф. 24-25 дек. 2015 г., г. Харьков. – Днепропетровск : Изд-во «Лира», 2015. – С. 25-29.

338. Гуцаленко, Ю. Г. Подготовка универсальных шлифовальных станков к реализации электрофизических технологий / Ю. Г. Гуцаленко, В. В. Ивкин, А. В. Руднев, Е. К. Севидова // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте : Материалы 16-го междунар. науч.-техн. семинара, 22-26 февр. 2016 г., г. Свалява. – Киев : АТМ Украины, 2016. – С. 64-68.

339. Белозеров, В. В. Модернизация алмазно-абразивных инструментов торцевого шлифования для технологий обработки с токоподводом на рабочую поверхность резания / В. В. Белозеров, Ю. Г. Гуцаленко, Е. К. Севидова, А. И. Махатилова // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта,

здоров'я [ISSN 2222-2944] : Тези доп. XXIV міжнар. наук.-практ. конф. (18-20 трав. 2016 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – Ч. I. – С. 91.

340. Гуцаленко, Ю. Г. Взрыв тонких стружек как фактор освобождения межзеренного пространства и повышения производительности алмазного шлифования в условиях действия электрических разрядов / Ю. Г. Гуцаленко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я [ISSN 2222-2944] : Тези доп. XXIV міжнар. наук.-практ. конф. (18-20 трав. 2016 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – Ч. I. – С. 101.

341. Гуцаленко, Ю. Г. Ограничение зоны токоподвода на металлический корпус алмазного шлифовального круга защитной электроизоляцией посадочных поверхностей / Ю. Г. Гуцаленко, А. В. Руднев, В. В. Ивкин, А. А. Лавринов, В. Л. Котенко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я [ISSN 2222-2944] : Тези доп. XXIV міжнар. наук.-практ. конф. (18-20 трав. 2016 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – Ч. I. – С. 106.

342. Севидова, О. К. Підвищення електроізоляційних властивостей МДО-покриттів на алюмінієвих корпусах шліфувальних кругів / О. К. Севидова І. І. Степанова Ю. Г. Гуцаленко К. М. Алексєєв // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я [ISSN 2222-2944] : Тези доп. XXIV міжнар. наук.-практ. конф. (18-20 трав. 2016 р., Харків). – У 4-х ч. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – Ч. I. – С. 153.

343. Гуцаленко, Ю. Г. Электроизоляционные решения инструментов из сверхтвердых материалов для адаптации к алмазно-искровому шлифованию / Ю. Г. Гуцаленко // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: материалы междунар. науч.-техн. конф., 21–23 сент. 2016 г., г. Одесса. – Одесса: ОНПУ, 2016. – С 38-41. [Прийнято до друку 29.08.2018р. Форум 21-23.09.2016 р.].

344. Гуцаленко, Ю. Г. Возможности развития современного станкостроения для реализации алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко,

Е. К. Севидова, Ивкин В. В., Руднев А. В., Аракелян А. А. // Физические и компьютерные технологии : Тр. 22-й междунар. науч.-практ. конф. 7-9 дек. 2016 г., г. Харьков. – Днепропетровск : Изд-во «Лира», 2016. – С. 52-55.

345. Гуцаленко, Ю. Г. Локальные электроизоляционные решения инструментов из сверхтвердых материалов для их расширенной адаптации к алмазно-искровому шлифованию / Ю. Г. Гуцаленко, К. Г. Янку, Е. К. Севидова, И. И. Степанова // Физические и компьютерные технологии : Тр. 22-й междунар. науч.-практ. конф. 7-9 дек. 2016 г., г. Харьков. – Днепропетровск : Изд-во «Лира», 2016. – С. 56-59.

346. Gutsalenko, Yu. G. Fracture features of metal binding when diamond-spark grinding / Yu. G. Gutsalenko // The Publications of the XXVI. microCAD International Scientific Conference 29-30 March 2012 [Электрон. Ресурс : электрон. текст. і граф. дані (150985 Кб). – 1 электрон. оптич. диск (CD-ROM); кольор.; 12 см. – ISBN 978-963-661-773-8]. – Miskolc : University of Miskolc [Угорщина], 2012 [Створено : 22 бер. 2012 р.]. – 6 электрон. сторінок (173 Кб) [Розміщено : L31\_Gutsalenko\_Yuriy.pdf]. – Англ. мовою.

347. Гуцаленко, Ю. Г. Критериальные признаки и ряд податливости металлов взрывному испарению при алмазно-искровом шлифовании / Ю. Г. Гуцаленко // Современные инновации в науке и технике : материалы 2-й междунар. науч.-практ. конф. 18 апр. 2012 г. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2012. – С. 12-15. – ISBN 978-5-905556-11-1.

348. Gutsalenko, Yu. G. Modernization Solutions Development to Implement the Diamond-Spark Grinding / Yu. G. Gutsalenko, E. K. Sevidova, A. V. Rudnev, V. V. Ivkin, N. V. Kryukova // The Publications of the XXVII. microCAD International Scientific Conference 21-22 March 2013 [Электрон. Ресурс : электрон. текст. і граф. дані (86477 Кб). – 1 электрон. оптич. диск (CD-ROM); кольор.; 12 см. – ISBN 978-963-358-018-9]. – Miskolc : University of Miskolc

[Угорщина], 2013 [Створено : 17 бер. 2013 р.]. – 6 електрон. сторінок (221 Кб)  
[Розміщено : L12\_Gutcalenko.pdf]. – Англ. мовою.

349. Гуцаленко, Ю. Г. Физика и практика электроконсолидации под давлением вольфрамокарбидных материалов и композитов / Ю. Г. Гуцаленко // Перспективные технологии консолидации материалов с применением электромагнитных полей. 2-й науч. Семинар : Тез. докл. Москва, 20-23 мая 2013 г. – М. : Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ», 2013. – С. 32. – На рус. и англ. яз.

350. Гуцаленко, Ю. Г. Физика и практика электроконсолидации под давлением вольфрамокарбидных материалов и композитов [электронный ресурс] : доклад / Ю. Г. Гуцаленко [НТУ «ХПИ»] // 2-я международная школа-семинар «Перспективные технологии консолидации материалов с применением электромагнитных полей»; г. Москва, Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ», ЛЭМПНМ, 20-23 мая 2013 г. – М. : Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ», 2013. – Электрон. дан. (32 с.: 26269538 байт). – Режим доступа : <http://lemc-lab.mephi.ru/content/file/news/gutsalenko.pdf>.

351. Гуцаленко, Ю. Г. Теория и практика оптимальной организации электроразрядных технологий спекания под давлением и алмазного шлифования порошковых материалов с высокоплотной структурой / Ю. Г. Гуцаленко // Современная наука : проблемы, инновации, решения : Материалы междунар. науч.-практ. конф. (Курск, 27-28 февр. 2014 г.). / Курск. ин-т социал. образования (филиал) РГСУ, инженер.-техн. фак. – Курск : ООО «Учитель», 2014. – С.36-39. – ISBN 978-5-905949-39-5.

352. Севидова, Е. К. Специальные электроизоляционные покрытия станкоинструментального назначения / Е. К. Севидова, Ю. Г. Гуцаленко, И. И. Степанова // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : Сб. науч. тр. XI-ой междунар. науч.-техн. конф. 19-21 мар. 2014 г. – В 4-х т. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – Т. 4. – С. 77-81. – ISBN 978-5-905556-88-3.

353. Гуцаленко, Ю. Г. Модель сглаживания шероховатости поверхности при алмазно-искровом шлифовании / Ю. Г. Гуцаленко // Современные инновации в науке и технике : Сб. науч. тр. 4-ой междунар. науч.-практ. конф. 17 апр. 2014 г. – В 4-х т. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – Т. 1. – С. 325-328. – ISBN 978-5-905556-98-2.

354. Гуцаленко, Ю. Г. Модель, условия и прогностические следствия осуществимости чистового алмазного шлифования кругами с режущими зёрнами различного заострения и притупления / Ю. Г. Гуцаленко // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях : Сб. науч. тр. 4-ой междунар. науч.-практ. конф. 4-5 июня 2014 г. – В 3-х т. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – Т. 1. – С. 171-175. – ISBN 978-5-9905633-5-3.

355. Гуцаленко, Ю. Г. Место и опыт сохранения доконсолидационной целостности и поверхностной износозащиты алмазных зёрен их металлизацией в задачах алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : Сб. науч. тр. XII-ой междунар. науч.-техн. конф. 19-20 мар. 2015 г. – В 4-х т. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, [ЗАО «Университетская книга»], 2015. – Т. 1. – С. 389-393. – ISBN 978-5-9906417-1-6.

356. Гуцаленко, Ю. Г. Новое в разработке и исследовании технических систем алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко, А. А. Аракелян // Прогрессивные технологии и процессы : Сб. науч. ст. 2-й междунар. молодежн. науч.-практ. конф. (24-25 сент. 2015 г. [г. Курск, Юго-Зап. гос. ун-т]). – В 3-х т. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, ЗАО «Университетская книга», 2015. – Т. 1 [ISBN 978-5-9907371-3-6]. – С. 276-279.

357. Гуцаленко, Ю. Г. Совершенствование типизации плоских отсеков модульного моделирования технических объектов формообразования в унифицированной системе многопараметрических отображений / Ю. Г. Гуцаленко, Н. В. Зубкова, Ю. В. Федюкин // Прогрессивные технологии и процессы : Сб. науч. ст. 2-й междунар. молодежн. науч.-практ. конф. (24-25

сент. 2015 г. [г. Курск, Юго-Зап. гос. ун-т]). – В 3-х т. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, ЗАО «Университетская книга», 2015. – Т. 1 [ISBN 978-5-9907371-3-6]. – С. 283-286.

358. Гуцаленко, Ю. Г. Согласование свойства гибкости и условия единства аппаратных возможностей многопараметрических отображений в модульном унифицированном моделировании технических систем формообразования / Ю. Г. Гуцаленко, Н. В. Зубкова, В. В. Соколова // Прогрессивные технологии и процессы : Сб. науч. ст. 2-й междунар. молодежн. науч.-практ. конф. (24-25 сент. 2015 г. [г. Курск, Юго-Зап. гос. ун-т]). – В 3-х т. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, ЗАО «Университетская книга», 2015. – Т. 1 [ISBN 978-5-9907371-3-6]. – С. 280-283.

359. Гуцаленко, Ю. Г. Спарк-плазменное спекание как модель электромеханических процессов в поверхностном слое объекта алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях : Сб. науч. тр. 5-ой междунар. науч.-практ. конф. 4-5 июня 2015 г. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, ЗАО «Университетская книга», 2015. – С. 115-117.

360. Гуцаленко, Ю. Г. Структурно-морфологические аналогии алмазно-искрового шлифования твердых сплавов и сталей / Ю. Г. Гуцаленко // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях : Сб. науч. тр. 5-ой междунар. науч.-практ. конф. 4-5 июня 2015 г. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, ЗАО «Университетская книга», 2015. – С. 112-115.

361. Гуцаленко, Ю. Г. Физические особенности применения инструментов с ультрадисперсными алмазами в составе металлопокрытий режущих зерен в технологиях алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Научно-техническое творчество : проблемы и перспективы : Сб. ст. X Всерос. науч.-техн. конф.-семинара [с междунар. участием, 28-29 мая 2015 г., г. Самара] [ISBN 978-5-7964-1864-2]. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2015. – С. 16-21.

362. Гуцаленко, Ю. Г. Формирование сглаженной шероховатости обработанной

поверхности при алмазно-искровом шлифовании / Ю. Г. Гуцаленко // Современная наука : проблемы, инновации, решения – III : Материалы междунар. науч.-практ. конф. (Курск, 10-11 дек. 2015 г.) [ISBN : 978-5-905949-74-6] / Курск. ин-т социал. образования (филиал) РГСУ. – Курск : ООО «Учитель», 2015. – С. 212-216.

363. Гуцаленко, Ю. Г. Формирование структур повышенной функциональности в твердых сплавах и сталях электроразрядными технологиями спекания и шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2015) = Innovations in mechanical engineering (Ispcime-2015) : сб. тр. 7-й междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 23–25 сент. 2015 г. [ISBN 978-5-906805-41-6] – Кемерово : КузГТУ, 2015. – С. 116-119. – <http://elibrary.ru/item.asp?id=24165305>.

364. Гуцаленко, Ю. Г. Экспертная система шероховатости поверхности торцевого алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко, А. В. Руднев // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : Сб. науч. тр. XII-ой междунар. науч.-техн. конф. 19-20 мар. 2015 г. – В 4-х т. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, [ЗАО «Университетская книга»], 2015. – Т. 1. – С. 385-389. – ISBN 978-5-9906417-1-6.

365. Гуцаленко, Ю. Г. Современные подходы к расширению технологических возможностей станкоинструментальных систем абразивной обработки для реализации алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Современная наука : проблемы, инновации, решения – IV : Материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием (Курск, 15-16 дек. 2016 г.) [ISBN : 978-5-905949-92-0] / Курск. ин-т социал. образования. – Курск : ООО «Учитель», 2016. – С. 7-12.

НАУКОВЕ МЕРЕЖЕВЕ ЕЛЕКТРОННЕ ВИДАННЯ

Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

*Гуцаленко Юрій Григорійович*

**Алмазно-іскрове шліфування  
матеріалів високої функціональності**

Монографія  
*Російською мовою*

В авторській комп'ютерній верстці

Відповідальній за випуск: *канд. техн. наук Гуськов А. А.*  
Веб-дизайн: *Хотиненко С. І.*

Підп. до сеті протокол № 12/1 від 29.12.2016. Обсяг даних 3,75 Мб.  
Гарнитура Таймс. Формат 60x90 1/8. Умов.друк.арк. 31,2. Облік.вид.арк. 32,1.

---

Видавництво «Курсор»  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи  
серія № 21 від 24.03.2000 р., 61057, Харків, Театральний пров., 11/13  
+38-057-7063173, [kursorf@lin.com.ua](mailto:kursorf@lin.com.ua)

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ»  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21  
<http://www.kpi.kharkov.ua>

---

Веб-майстерня відділу наукових видань при кафедрі інтегрованих технологій  
машинобудування ім. М.Ф. Семка НТУ «ХПІ», 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21  
+38-057-7076185, [hightech@kpi.kharkov.ua](mailto:hightech@kpi.kharkov.ua)